



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE UN REACTOR *BATCH* TERMO-CONTROLADO PARA LA  
ELABORACIÓN DE HERBICIDAS LÍQUIDOS A BASE DE GLIFOSATO,  
UTILIZANDO DATOS FISICOQUÍMICOS Y TERMODINÁMICOS**

**Francisco Javier Granados Morales**

Asesorado por la MSc. Inga. Irma Odette Peláez Sánchez

Guatemala, julio de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN REACTOR *BATCH* TERMO-CONTROLADO PARA LA  
ELABORACIÓN DE HERBICIDAS LÍQUIDOS A BASE DE GLIFOSATO,  
UTILIZANDO DATOS FISICOQUÍMICOS Y TERMODINÁMICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**FRANCISCO JAVIER GRANADOS MORALES**  
ASESORADO POR LA MSC. INGA. IRMA ODETTE PELÁEZ SÁNCHEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

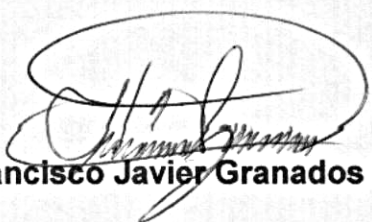
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdéz
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert De León Morales
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE UN REACTOR *BATCH* TERMO-CONTROLADO PARA LA  
ELABORACIÓN DE HERBICIDAS LÍQUIDOS A BASE DE GLIFOSATO,  
UTILIZANDO DATOS FISICOQUÍMICOS Y TERMODINÁMICOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 19 de febrero de 2015.



**Francisco Javier Granados Morales**



Guatemala 10 de Febrero de 2016

Ingeniero

Carlos S. Wong Davi

Director de la Escuela de Ingeniería Química

Facultad de Ingeniería

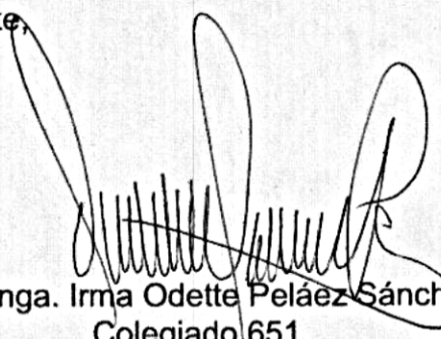
Ciudad Universitaria

Estimado Ingeniero:

Por medio de la presente quiero informarle de que he efectuado la revisión del informe final de tesis titulado: **DISEÑO DE UN REACTOR BATCH TERMO-CONTROLADO PARA LA ELABORACIÓN DE HERBICIDAS LÍQUIDOS A BASE DE GLIFOSATO, UTILIZANDO DATOS FISICOQUÍMICOS Y TERMODINÁMICOS**, perteneciente al estudiante Francisco Javier Granados Morales, con Carné universitario 1999-11964, estudiante de Ingeniería Química en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Considero que la misma cumple con los requisitos establecidos para ser aprobado por la Escuela de Ingeniería Química como trabajo de graduación.

Me suscribo de usted atentamente,



Msc. Inga. Irma Odette Peláez Sánchez  
Colegiado 651  
Asesora Tesis

*Irma Odette Peláez Sánchez*  
INGENIERO QUÍMICO  
Colegiada No. 651





Guatemala, 16 de mayo de 2016.  
Ref. EIQ.TG-IF.028.2016.

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **004-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Francisco Javier Granados Morales**.  
Identificado con número de carné: **1999-11964**.  
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

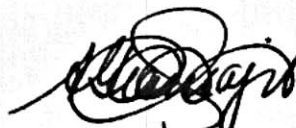
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

### DISEÑO DE UN REACTOR BATCH TERMO-CONTROLADO PARA LA ELABORACIÓN DE HERBICIDAS LÍQUIDOS A BASE DE GLIFOSATO, UTILIZANDO DATOS FÍSICOQUÍMICOS Y TERMODINÁMICOS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Irma Odette Peláez Sánchez**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAR A TODOS"

  
Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo







Ref.EIQ.TG.039.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **FRANCISCO JAVIER GRANADOS MORALES** titulado: **"DISEÑO DE UN REACTOR BATCH TERMO-CONTROLADO PARA LA ELABORACIÓN DE HERBICIDAS LÍQUIDOS A BASE DE GLIFOSATO, UTILIZANDO DATOS FISICOQUÍMICOS Y TERMODINÁMICOS"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Carlos Salvador Wong Davila  
Director  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, junio 2016

Cc: Archivo  
CSWD/ale



Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.302-2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN REACTOR BATCH TERMO-CONTROLADO PARA LA ELABORACIÓN DE HERBICIDAS LÍQUIDOS A BASE DE GLIFOSATO, UTILIZANDO DATOS FISICOQUÍMICOS Y TERMODINÁMICOS**, presentado por el estudiante universitario: **Francisco Javier Granados Morales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, julio de 2016



/cc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por ser mi camino, mi guía y mi fortaleza, y darme la oportunidad de culminar una etapa más en mi vida.

### **Mis padres**

Augusto Granados y Maritza Morales, por todo su esfuerzo, paciencia, confianza y apoyo desde el inicio de mi carrera, por ser ese ejemplo de responsabilidad, constancia y dedicación y motivarme a salir adelante.

### **Mi esposa**

Susana Salazar, por estar a mi lado apoyándome y alentándome incondicionalmente en la culminación de mis sueños y metas.

### **Mis hijos**

Susana Isabella y Francisco Andrés, por ser mi fuente de inspiración y la razón por la cual mi vida está llena de felicidad y entusiasmo para no desmayar ante cualquier obstáculo en mi vida.

### **Mis hermanos**

Por todo su apoyo, sus consejos, por darme ánimo y alentarme a seguir adelante para poder cumplir esta meta profesional.

**Toda mi familia**

Por estar siempre pendientes de mí y darme ánimos en todo momento, y compartir conmigo este éxito en mi vida.

**Mis amigos**

Por todo su apoyo en la culminación de mi carrera.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser una importante influencia en mi carrera profesional.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por proporcionarme una educación de calidad acreditada y actualizada.
<b>Mis asesores</b>	Ingeniera Irma Odette Peláez Sánchez, doctor Víctor Quiroa, por su dirección, apoyo e invaluable ayuda en la realización de mi trabajo de graduación.
<b>Mi hijo</b>	Javier Andrés Granados Salazar, por ser mi ángel de la guarda, sé que desde el cielo pide a Dios por mí.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
Hipótesis .....	XVIII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1.    MARCO TEÓRICO.....	1
1.1.    Generalidades del glifosato .....	1
1.1.1.    Nombres alternativos y formulaciones.....	2
1.1.2.    Descripción general y sus formulaciones .....	4
1.1.2.1.    Caracterización fisicoquímica .....	4
1.1.2.2.    Formulaciones más frecuentes.....	7
1.1.2.3.    Caracterización física.....	8
1.1.3.    Mecanismo de síntesis .....	10
1.1.4.    Velocidad de reacción .....	11
1.1.5.    Cinética de segundo orden .....	11
1.1.6.    El orden de reacción.....	14
1.1.7.    Mecanismos de reacción .....	16
1.1.7.1.    Teoría de las colisiones .....	16
1.1.8.    Molecularidad y orden de reacción .....	17
1.1.9.    Mecanismo y ley de velocidad .....	17
1.1.10.    Variación de la energía en el transcurso de una reacción .....	18



1.1.11.	La ecuación de Arrhenius.....	19
1.2.	Reactores químicos.....	20
1.2.1.	Generalidades .....	20
1.2.2.	Clasificación .....	21
1.2.3.	Reactores ideales.....	26
1.2.4.	Reactores tipo <i>batch</i> .....	27
1.3.	Torres de enfriamiento .....	31
1.3.1.	Generalidades .....	31
1.3.2.	Tipos de torres de enfriamiento .....	35
1.3.2.1.	Torres de circulación natural .....	35
1.3.3.	Torres de enfriamiento de tiro forzado .....	39
1.4.	Psicometría .....	41
2.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	47
2.1.	Delimitación del campo de estudio.....	47
2.2.	Recursos .....	47
3.	TÉCNICAS Y MÉTODOS .....	49
3.1.	Obtención de datos .....	49
3.2.	Análisis de datos e interpretación de resultados .....	58
3.3.	Cálculos para la fabricación de una torre de enfriamiento de tiro forzado como auxiliar a la que actualmente tiene la empresa XYZ .....	65
3.3.1.	Determinación del tamaño de la torre de enfriamiento.....	66
3.3.2.	Cálculo y escalamiento de los ventiladores.....	73
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	77

CONCLUSIONES .....	81
RECOMENDACIONES.....	83
BIBLIOGRAFÍA.....	85
APÉNDICES .....	89





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Caracterización fisicoquímica del glifosato. N-fosfonometilglicina .....	4
2.	Ingrediente activo .....	9
3.	Ejemplo de velocidad de reacción .....	14
4.	Explicación de un mecanismo de reacción .....	17
5.	Explicación molecularidad y orden de reacción .....	17
6.	Mecanismo y ley de velocidad. Etapa determinante de la velocidad ...	18
7.	Explicación de energía de activación .....	18
8.	Explicación de la ecuación de Arrhenius con respecto a la variación de la energía en el transcurso de una reacción .....	19
9.	Criterios para la clasificación de reactores .....	26
10.	Tipos de reactores ideales .....	27
11.	Reactor tipo <i>batch</i> .....	28
12.	Esquema de enfriamiento por evaporación .....	32
13.	Partes de una torre enfriamiento .....	33
14.	Torre de tiro natural atmosférica .....	35
15.	Torre de enfriamiento de tiro natural 1 .....	36
16.	Torre de enfriamiento de tiro natural 2 .....	37
17.	Torre de enfriamiento de tiro inducido .....	38
18.	Torre de tiro forzado .....	38
19.	Torre de enfriamiento de flujo cruzado .....	39
20.	Carta psicométrica .....	42
21.	Líneas de bulbo seco .....	43
22.	Líneas de humedad relativa .....	44



23.	Líneas humedad absoluta.....	44
24.	Líneas de bulbo húmedo .....	45
25.	Líneas de punto de rocío .....	45
26.	Líneas de entalpía .....	46
27.	Consumo de reactivo limitante en el tiempo .....	50
28.	Variación del pH en el tiempo .....	51
29.	Comportamiento de la temperatura en el tiempo.....	53
30.	Consumo de reactivo limitante en el tiempo .....	54
31.	Ajuste de reacción a segundo orden.....	55
32.	Balanza de densidades.....	56
33.	HPLC .....	57
34.	Potenciómetro.....	57
35.	Concentración final contra el consumo IPA .....	60
36.	Ácido teórico necesario en cada <i>batch</i> para hacerlo reaccionar con el IPA .....	62
37.	Grado de conversión del glifosato en producto.....	64
38.	Temperatura final contra el día de producción.....	64
39.	Concentración del ingrediente activo contra día de producción.....	65
40.	Prototipo experimental de torre de enfriamiento .....	68
41.	Medición de caída de presión en la empaquetadura .....	69
42.	Similitud dinámica .....	74

## TABLAS

I.	Presentaciones comerciales de glifosato como sal .....	2
II.	Ecuaciones cinéticas en forma diferencial como integral para distintos sistemas químicos .....	12
III.	Ecuaciones cinéticas en forma diferencial como integral para distintos sistemas .....	13

IV.	Leyes de velocidad y órdenes de algunas reacciones químicas.....	15
V.	Velocidades de reacción de acuerdo a la orden .....	15
VI.	Consumo de reactivo limitante en el tiempo.....	49
VII.	Variación del pH en el tiempo .....	50
VIII.	Comportamiento de la temperatura en el tiempo .....	51
IX.	Consumo reactivo limitante en el tiempo.....	53
X.	Ajuste gráfico a reacción de segundo orden .....	54
XI.	Resultados días de producción/ <i>batch</i> .....	56
XII.	Resultados IPA teórica.....	60
XIII.	Ácido teórico necesario en cada <i>batch</i> para hacerlo reaccionar con el IPA .....	61
XIV.	Temperaturas finales en los días de producción.....	63





## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>BTU</b>	British thermal unit
<b>°C</b>	Grado Celsius
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>g</b>	Gramo
<b>h</b>	Hora
<b>J</b>	Joule
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>Lb</b>	Libra
<b>L</b>	Litro
<b>M</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>min</b>	Minuto
<b>M</b>	Molar
<b>Nm</b>	Nanómetro
<b>ft</b>	Pie
<b>ft<sup>2</sup></b>	Pie cuadrado
<b>ft<sup>3</sup></b>	Pie cúbico
<b>pH</b>	Potencial de iones hidrógeno
<b>s</b>	Segundo



## **GLOSARIO**

<b>Carta psicométrica</b>	Diagrama de doble entrada en el que se relacionan múltiples parámetros referentes a una mezcla de aire húmedo: temperatura, humedad relativa, humedad absoluta, punto de rocío, entalpía específica o calor punto total, calor sensible, calor latente y volumen total; y volumen específico del aire.
<b>Caudal</b>	Cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo. Normalmente, se identifica con el volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.
<b>Cinética química</b>	Área de la fisicoquímica que estudia la velocidad de una reacción química, cómo cambia la rapidez de reacción bajo condiciones variables y que en eventos moleculares se efectúan mediante la reacción general.
<b>Conducción</b>	Mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos sistemas, basado en el contacto directo de sus partículas; sin flujo neto de materia; tiende a igualar la temperatura dentro de un cuerpo entre diferentes cuerpos en contact por medio de ondas.



<b>Densidad</b>	Magnitud escalar referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen.
<b>Eficiencia</b>	Relación entre la energía útil y la invertida.
<b>Entalpía</b>	Magnitud termodinámica cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico.
<b>Fisicoquímica</b>	Ciencia que estudia las relaciones recíprocas entre los fenómenos físicos y químicos.
<b>Humedad absoluta</b>	Peso del vapor de agua por unidad de volumen. Esta unidad de volumen, generalmente es un espacio de un metro cúbico (o un pie cúbico). En este espacio, normalmente hay aire también, aunque no necesariamente.
<b>Humedad relativa</b>	Término utilizado para expresar la cantidad de humedad en una muestra dada de aire, en comparación con la cantidad de humedad que el aire tendría, estando totalmente saturado y a la misma temperatura de la muestra. La humedad relativa se expresa en porcentaje.
<b>IPA</b>	Isopropilamina reactivo que está en exceso.

**Reacción química**

Proceso termodinámico en el cual uno o más reactivos se transforman por un efecto energético, cambiando su estructura molecular y sus enlaces, en otras sustancias llamadas productos.

**Reactivo**

Sustancia participante para llevar a cabo una reacción química que da lugar a otras sustancias con propiedades, características y conformación distinta, denominadas productos.

**Temperatura  
bulbo húmedo**

Temperatura de equilibrio que se alcanza cuando la mezcla de aire seco y vapor de agua pasa por un proceso de enfriamiento adiabático hasta llegar a la saturación. La inclinación de la línea de temperatura húmeda constante refleja el calor de vaporización (evaporación) del agua requerido para saturar una cantidad de aire a una humedad relativa dada.

**Temperatura de rocío**

Temperatura a la que una muestra de aire húmedo en las mismas condiciones de presión alcanza la saturación de vapor de agua. En este punto de saturación, el vapor de agua comenzaría a condensarse en agua líquida o (si estuviera por debajo del punto de congelación) en escarcha, al continuar quitando calor.

**Temperatura de bulbo seco**

Es la verdadera temperatura del aire húmedo y con frecuencia se la denomina solo temperatura del aire, que marca un termómetro común. Se llama temperatura seca del aire de un entorno o temperatura seca, a la temperatura del aire, prescindiendo de la radiación calorífica de los objetos que rodean ese ambiente concreto y de los efectos de la humedad relativa y de los movimientos de aire.

**Termodinámica**

Rama de la física que estudia los efectos de los cambios de magnitudes de los sistemas a un nivel macroscópico. Constituye una teoría fenomenológica, a partir de razonamientos deductivos, que estudia sistemas reales sin modelar y sigue un método experimental. Los cambios estudiados son los de temperatura, presión y volumen.

**Volatilidad**

Medida de la tendencia de una sustancia a evaporarse.

## RESUMEN

El presente estudio analiza la efectividad de un reactor químico tipo *batch* donde se lleva a cabo la reacción exotérmica de glifosato pécnico isopropilamina, para obtener sal de glifosato en solución, desde el punto de vista del control de la reacción y control de temperatura.

El objetivo final es mejorar el control existente de temperatura en las diferentes partes del proceso, y de manera especial, durante la reacción, implementando y ajustando un nuevo control, que permita una reducción del tiempo total del proceso, así como un incremento en el rendimiento respecto al control actual (termo-control).

En la empresa en cuestión, el glifosato pécnico e isopropilamina debieran convertirse en el ingrediente activo (sal de glifosato en solución) de manera definida y controlada. El descontrol de estas reacciones pueden ocurrir por mal funcionamiento del sistema de enfriamiento o por una carga incorrecta de reactivos. En la actualidad, la empresa en cuestión cuenta con una torre de enfriamiento de tiro forzado con capacidad de enfriamiento de 3 500 litros cada 2 días. Hoy se producen 88 000 litros al día, por lo que se demuestra que el descontrol de temperatura final del proceso es superior al estequiométrico de la base. La temperatura debería mantenerse entre 50 y 55 °C durante todo el proceso, que es la temperatura óptima de acuerdo a la velocidad de reacción y evaporación de la base.

Se demuestra, que siendo una reacción de segundo orden y pudiendo ser controlada por mezcla total, el diseño de volumen del mezclado de reactor no



es relevante. Siendo el mezclado uno de los factores determinantes para completar la reacción y el otro factor el enfriamiento; se demuestra que el diseño físico del reactor no requiere modificaciones en la mayoría de los casos, como ocurre en esta planta estudiada. El factor determinante en este diseño se encuentra en el enfriamiento.

## OBJETIVOS

### General

Diseñar un reactor *batch* termocontrolado utilizando datos fisicoquímicos, termodinámicos y cinéticos de sus compuestos base.

### Específicos

1. Verificar que el calor de reacción, fusión y solución del glifosato pueden ser utilizados para el diseño de un reactor *batch* termocontrolado en una planta formuladora de herbicidas líquidos.
2. Diseñar un reactor *batch* termocontrolado para la elaboración de herbicidas líquidos tomando en consideración la solubilidad del glifosato en función del Ph, temperatura, agua, alcohol, xileno, glicol.

## **Hipótesis**

Es posible utilizar los mecanismos de reacción del glifosato para diseñar un reactor tipo *batch* termocontrolado en una planta formuladora de herbicidas líquidos.

## **Hipótesis nula**

No es posible utilizar los mecanismos de reacción del glifosato para diseñar un reactor tipo *batch* termocontrolado en una planta formuladora de herbicidas líquidos.

## INTRODUCCIÓN

Glifosato es un herbicida no selectivo de acción sistémica, de amplio espectro, y adecuado para el control de muchas especies de malezas, en tratamientos de posemergencia al follaje. Es una solución líquida, clara, viscosa y de color ambarino; normalmente tiene una concentración de iones H de 4,4 a 4,9 y una gravedad específica de 1,17. Prácticamente inoloro o con un ligero olor a amina; tiene un peso molecular de 169,08 y un punto de fusión de 200 °C.

Se desconoce la conversión y selectividad de la reacción química exotérmica que ocurre al mezclar en un reactor tipo *batch* glifosato con agua.

Se desconoce cuándo se convierte a producto terminado en cada instante y cuál es el punto de equilibrio de la reacción. Asimismo, el tamaño óptimo del reactor y método de operación que pueda predecir con cierta certidumbre la conducta del reactor ante ciertas condiciones (velocidad de reacción, temperatura, velocidad de dosificación, evacuación de calor).

El presente estudio tomará en consideración el glifosato como base para la fabricación de herbicidas líquidos. Sus propiedades físicas, químicas, termodinámicas, entre otras, servirán como base para el diseño de un reactor *batch* termocontrolado en cuyo interior tendrá lugar una reacción química de tipo exotérmico. La idea del diseño será maximizar la conversión y selectividad de la reacción al menor coste posible; el diseño de este reactor químico requerirá conocimientos de termodinámica, cinética química, transferencia de masa y energía, así como de mecánica de fluidos; balances de materia y



energía. Se buscará conocer el tamaño del reactor, así como el método de operación, además, con base en los parámetros de diseño se espera poder predecir con cierta certidumbre la conducta del reactor ante ciertas condiciones, por ejemplo, un salto en escalón en la composición de entrada.

Debido a que el tema central es un reactor tipo *batch* que trabaja en estado no estacionario (tanque agitado); el reactor en cuestión tendrá la ventaja de que su costo de instrumentación será bajo, además de ser flexible en su uso (se le puede detener de modo fácil y rápido). Tendrá la desventaja de un elevado costo en su funcionamiento y de mano de obra debido a la gran cantidad de tiempo que se pasa parado por la carga, descarga y limpieza. Además, no siempre es posible implementar un sistema de control adecuado.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Generalidades del glifosato

El herbicida con materia activa glifosato, descubierto y desarrollado por Monsanto a partir de 1970, ha representado un hito en la agricultura contemporánea, gracias a su baja peligrosidad, su eficacia duradera contra un amplio espectro de malezas anuales y perennes, y su inactivación en contacto con el suelo. Estas tres características justifican que 33 años después de sus primeras aplicaciones comerciales, el glifosato sea hoy el producto fitosanitario más empleado del mundo<sup>1</sup>.

Con base en la información relevada a la fecha (2014), cabe concluir que, bajo condiciones de uso responsable (entendiendo por ello la aplicación de dosis recomendadas y de acuerdo con buenas prácticas agrícolas), el glifosato y sus formulados implicarían un bajo riesgo para la salud humana o el ambiente. Ello sin perjuicio de la necesaria ejecución sostenida en el tiempo de controles sistemáticos sobre los niveles residuales del herbicida y los compuestos de degradación en alimentos, en la biota, en el ambiente y en la población expuesta, así como de estudios exhaustivos de laboratorio y de campo, que involucren a los formulados conteniendo glifosato y también su interacción con otros agroquímicos, bajo las condiciones actuales de uso en Guatemala<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Monsanto. *Seguridad del herbicida roundup ready, y de su empleo sobre variedades modificadas genéticamente para tolerancia a glifosato*. <http://www.monsanto.com/global/es/noticias-y-opiniones/documents/cuaderno6.pdf>. Consulta: febrero de 2015.

<sup>2</sup> CONICET, C. N. *Evaluación de la información científica vinculada al glifosato en su incidencia sobre la salud humana y el ambiente*. p. 35.

### 1.1.1. Nombres alternativos y formulaciones

El glifosato se comercializa en la forma de concentrados solubles de la sal isopropanolamina del N- (fosfonometil) glicine, en los cuales se integran el glifosato y los ingredientes, inertes requeridos para cada tipo de formulación comercial. Aunque la forma de comercialización más común son los concentrados solubles en agua, también es posible tener acceso a las siguientes preparaciones para uso específicos.

- Ingrediente de grado químicamente puro (para uso de laboratorio)
- Ingrediente de grado técnico
- Concentrados emulsionables y concentrados en emulsiones invertidas
- Concentrados solubles en agua, de diferente concentración
- Polvos mojables, solubles en agua y para espolvoreo
- Formulaciones fumigantes
- Formulaciones granulares, (formulaciones en peletas)
- Formulaciones encapsuladas

En el mercado guatemalteco existen las presentaciones comerciales formuladas por empresas establecidas en el país, los más conocidos se presentan en la tabla I.

Tabla I. **Presentaciones comerciales de glifosato como sal**

Nombre comercial	Firmas productoras	Concentración *	Registro ICA
Faena 320	Proficol SA	320 g/L	1800
Faena 320 SL	Monsanto colombiana	320 g/L	1775
Fuete SL	Monsanto colombiana	480 g/L	2475
Ranger SL	Monsanto colombiana	240 g/L	2312
Rocket SG	Monsanto colombiana	74-75%	1993
Rocky SL	Monsanto colombiana	120 g/L	1757
Roundup madurante SL	Monsanto colombiana	480 g/L	2670
Roundup SG	Monsanto colombiana	74-75%	2488

Continuación de la tabla I.

Roundup SL (Sal)	Monsanto colombiana	480 g/L	756
Glifosato 48 SL	Coagro Ltda	48%	2699
Clinofox	Cedar Crystal Chemical	480 g/L	2490
Glifosol SL	Colijap Ind. Agroquímica	480 g/L	2337
Glyfosan SL	Químicos e insumos agrícolas	480 g/L	2234
Glyphogan 480 SL	Magan de colombia	480 g/L	2530
Candela 120 SL	Agroser S A	120 g/L	2233
Candela XL	Agroser S A	120 g/L	2800
Coloso SL	Basf química colombiana	480 g/L	2609
Panzer 320 SL	Invequímica S A	320 g/L	2569
Panzer 480 SL	Invequímica S A	480 g/L	2399
Regio SL	Quimor S A	480 g/L	2211

Fuente: CONICET. *Evaluación de la información científica vinculada al glifosato en su incidencia sobre la salud humana y el ambiente.* p. 39.

Se nombra de las siguientes formas posibles [CAS]:

- Glyphosate-diammonium [69254-40-6]
- Glyphosate-dimethylammonium [34494-04-7]
- Glyphosate- isopropylammonium [38641-94-0]
- Glyphosate-monoammonium [40465-66-5]
- Glyphosate-potassium [70901-20-1]
- Glyphosate-sesquisodium [70393-85-0]
- Glyphosate- trimesium [81591-81-3]

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda la clasificación del glifosato de acuerdo con su peligrosidad como de clase IV: “Poco probable que presente peligro en condiciones de uso normal”. La Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. de Norteamérica (USEPA), lo ubica como compuesto clase III: “Irritante leve” (IPCS, 2005) [...]<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> CONICET, C. N. *Evaluación de la información científica vinculada al glifosato en su incidencia sobre la salud humana y el ambiente.* p. 40.

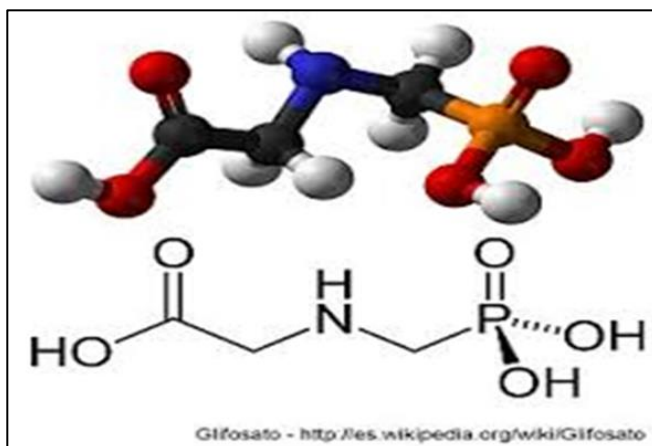
### 1.1.2. Descripción general y sus formulaciones

El glifosato es un aminofosfonato y un análogo del aminoácido natural glicina. El nombre es la contracción de glicina, fosfo y ato, partícula que designa a la base conjugada de un ácido.

#### 1.1.2.1. Caracterización fisicoquímica

El glifosato es el nombre común de la sustancia N-(fosfonometil)-glicina, cuya fórmula molecular es  $C_3H_8NO_5P$  y la fórmula desarrollada se describe en la figura 1.

Figura 1. Caracterización fisicoquímica del glifosato. N-fosfonometilglicina



Fuente: Monsanto. *Seguridad del herbicida roundup ready, y de su empleo sobre variedades modificadas genéticamente para tolerancia a glifosato*. <http://www.monsanto.com/global/es/noticias-y-opiniones/documents/cuaderno6.pdf>. Consulta: febrero de 2015.

- Número CAS: 1071-83-6
- Peso molecular: 169



- Punto de fusión: 189,5 °C (sólido a temperatura ambiente)
- Presión de vapor:  $1,31 \times 10^{-5}$  Pa (volatilidad despreciable, pues este valor es unos 178 millones de veces inferior al del agua).
- Descomposición por luz de lámpara Xenon al 50 % en 33 días (pH 5), 69 d (pH 7) y 77 d (pH 9).
- Solubilidad en agua (pH 2): 10,5 g/l a 20 °C (mayor a pH neutro/alcalino). Esta solubilidad es aún mayor y prácticamente total cuando la materia activa se presenta en forma de sales isopropilamina, amónica, sódica o potásica, lo que facilita la preparación del caldo de pulverización.
- Solubilidad en acetona: 0,078 g/l a 20 °C
- Solubilidad en diclorometano: 0,233 g/l a 20 °C
- Solubilidad en metanol: 0,231 g/l a 20 °C
- Solubilidad en n-octanol: 0,020 g/l a 20 °C
- Coeficiente de partición octanol/agua (Pow): 0,00063 a 25 °C (log Pow = - 3,2).
- Este coeficiente es muy importante, pues un valor tan bajo prácticamente descarta el riesgo de bioacumulación en tejidos grasos y sugiere la concentración de residuos en la fracción acuosa de las cosechas.
- Estabilidad en agua: estable frente a la hidrólisis entre pH 5 y pH 9 (a 25 °C).
- Constantes de disociación (pKa): 2,34 (20 °C), 5,73 (20 °C) y 10,2 (20 °C). Esto implica que el glifosato puede encontrarse, fundamentalmente, como una molécula no disociada sin cargas a pH < 2,34, con una carga negativa entre pH 2,34 y 5,73, con dos cargas negativas entre pH 5,73 y 10,2 o bien con 3 cargas negativas a pH > 10,2
- Riesgo de inflamación: no inflamable
- Propiedades explosivas: no explosivo
- Uso: herbicida

- Clasificación química fosfonglicina o más genérico: herbicida organofosforado.

Se trata de un ácido orgánico débil que consiste en un grupo glicina y un grupo fosfometilo. El nombre químico es N- (fosfometil) glicina de acuerdo a nomenclatura IUPAC. El número CAS de registro es 1071-83-6.

Su peso molecular relativo es de 169,07.

El glifosato se formula usualmente como la sal del ácido desprotonado del glifosato y un catión (ej. isopropilamina). El registro CAS de esta última es 38641-94-0.

Este herbicida es un compuesto anfotérico, con 4 especies iónicas de pK entre 2 y hasta 10,6.

El glifosato puede contener cantidades traza de N-nitroso glifosato, compuesto que, también puede formarse en el ambiente al combinarse con nitratos (presente en fertilizantes). La mayoría de los compuestos N-nitroso son cancerígenos. Datos obtenidos de (Comité Europeo, 2002)

#### **1.1.2.2. Formulaciones más frecuentes**

Los ingredientes básicos son: la sal isopropilamina (IPA) del glifosato + un surfactante + agua. La formulación más extendida es el Roundup®, la que contiene 480 g/L de la sal IPA (equivalente a 360 g/L del ácido libre).

Las formulaciones más utilizadas se basan en concentrados solubles granulados con agregados de coadyuvantes siliconados con concentraciones de principio activo de entre el 66 y el 79 %. Otras formulaciones responden a concentrados solubles, sin coadyuvantes, con una concentración del 48 % del principio activo.

El aditivo más frecuentemente utilizado es el surfactante tallowamina polietoxilado (polietoxilated tallowamine surfactante o “POEA” CAS 61791-26-2). Se trata de un preparado sintético derivado de ácidos grasos animales, mezcla de alquilaminas polietoxiladas de cadena larga. El surfactante puede llegar a ser típicamente un 15 % de la formulación.

Los llamados elementos inertes actúan como solventes y humectantes capaces de aumentar la permeabilidad y atravesar la barrera cuticular vegetal. Los diferentes fabricantes de herbicidas con base de glifosato no indican en sus etiquetas la presencia de estos elementos inertes.

El glifosato se provee en varias formulaciones para diferentes usos:

- Sal de amonio
- Sal amina isopropil
- Glifosato ácido-standalone, tanto como sal amoniacal o sal isopropil
- Sal potásica

Los productos pueden formularse con 120, 240, 360, 480, 680 g de ingrediente activo por litro. La formulación más común en agricultura es 360 g/L, tanto sola como con surfactantes catiónicos<sup>4</sup>.

### **1.1.2.3. Caracterización física**

El glifosato es un preparado en forma de líquido soluble en agua que contiene 360 g/L (36 % p/v) de glifosato, neutralizado en forma de sal isopropilamina para una disolución, empleo y limpieza más fácil. Este herbicida incluye un contenido adecuado de surfactantes y coadyuvantes que faciliten un excelente control de malas hierbas sin perjudicar a los organismos.

Es un producto no inflamable ni explosivo, con una estabilidad superior a 5 años en envases cerrados. El almacenamiento debe llevarse a cabo bajo temperaturas entre -15 y 50 °C. Si llega a congelarse, hay que colocarlo en un lugar cálido y agitarse frecuentemente para disolver de nuevo el producto.

Es un líquido de color verde, olor terroso y completamente soluble en agua. Tiene una densidad de alrededor de 1,17 g/cm<sup>3</sup> y un pH entre 4,6-5,0.

Se recomienda mantener el producto en sus envases originales. El acero galvanizado y el acero blando sin revestimiento son materiales incompatibles, pues daría lugar a la formación de hidrógeno, un gas altamente inflamable que puede explotar en ambientes cerrados. Son sustancias compatibles para el almacenamiento el acero inoxidable, el aluminio, la fibra de vidrio, plásticos y el revestimiento vidriado.

---

<sup>4</sup> FAO. 37 FAO/WHO JMPR, *Pesticide residues in food, meetings in Roma & Genève*, FAO Plant production & protection. p. 45.

En caso de incendio, se recomienda el empleo de polvo seco, agua, espuma o dióxido de carbono, minimizando el uso de agua para evitar la contaminación del entorno.

En caso de vertido accidental, se recomienda absorber con tierra o materias absorbentes, manteniendo estos materiales alejados de desagües, alcantarillas y corrientes de agua.

Nunca limpiar el equipo de aplicación del producto cerca de aguas superficiales. Evitar la contaminación a través de los sistemas de evacuación de aguas de las explotaciones o de los caminos<sup>5</sup>.

De acuerdo con el fabricante, la formulación típica del glifosato de uso comercial, en su presentación de líquido soluble, corresponde a:

Figura 2.      **Ingrediente ctivo**

<b>Ingrediente activo:</b>	<b>Glifosato, N-(Fosfonometil) glicina, en sal isopropilamina,</b>	<b>41,0 %</b>
<b>Inertes</b>	<b>(Seboaminas etoxiladas)*</b>	<b>59,0 %</b>
* Sustancias químicas peligrosas, en concepto de algunas entidades normativas, y capaces de causar irritación gastrointestinal, náuseas, vómito y diarrea.		

Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de Ingeniería de las reacciones químicas*. p. 297.

Algunas de las formulaciones comerciales del glifosato incorporaban un surfactante conocido como POEA, en una proporción cercana al 15 %. Este compuesto, según varias investigaciones toxicológicas, puede ser causa de daños gastrointestinales, ciertas afecciones al sistema nervioso central, algunos

<sup>5</sup> Monsanto. *Seguridad del herbicida roundup ready, y de su empleo sobre variedades modificadas genéticamente para tolerancia a glifosato*. <http://www.monsanto.com/global/es/noticias-y-opiniones/documents/cuaderno6.pdf>. Consulta: febrero de 2015.

problemas respiratorios y ser capaz de destruir los glóbulos rojos en la sangre humana.

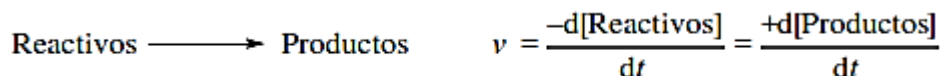
Del POEA se dice que puede contener una impureza identificada como 1-4 dioxano, la cual se menciona igualmente, que ha demostrado tener capacidad cancerígena para animales y de causar daño en el hígado y los riñones de los humanos<sup>6</sup>.

### 1.1.3. Mecanismo de síntesis

En el estudio de una reacción química hay dos aspectos fundamentales a tener en cuenta, uno estático y otro dinámico. Del primero se ocupa la termodinámica y del segundo la cinética.

Así, la termodinámica solo se interesa por los estados inicial y final del sistema, se ocupa de sistemas en equilibrio. Estudia la dirección y la extensión con que se produce la reacción, e informa sobre si una reacción es o no posible<sup>7</sup>.

La cinética química estudia las velocidades de las reacciones químicas y los mecanismos de los cuáles estas se producen. La velocidad de reacción es la velocidad con la que desciende la reacción de un reactivo o aumenta la de un producto en el curso de una reacción.



---

<sup>6</sup> FAO. 37 FAO/WHO JMPR, *Pesticide residues in food, meetings in Roma & Genève*, FAO Plant production & protection. p. 47.

<sup>7</sup> GONZALES-UREÑA, Angel. *Cinética química*. p. 96.

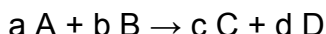


#### 1.1.4. Velocidad de reacción

Se ha encontrado que la velocidad de una reacción depende de la naturaleza de los reactivos (estado físico, grosor de la partícula, entre otros), la concentración de los reactivos, la temperatura y los catalizadores.

Del estudio experimental de la cinética de una reacción química, se deduce su ley de velocidad, que es una ecuación que expresa la velocidad en función de las concentraciones de las sustancias que toman parte de la reacción y que normalmente tienen la forma

$$V = k[\text{Reactivos}]^x$$



ley de velocidad:

$$v = k [A]^m [B]^n \dots$$

$m, n \dots$  = órdenes de reacción parciales  $m + n + \dots$  = orden de reacción total

$k$  = constante de velocidad (función de la temperatura, de la propia reacción y – si lo hay- del catalizador )

La ecuación de velocidad integrada da las concentraciones de reactivos y productos en función del tiempo. Se obtiene por integración de la ley de velocidad:

#### 1.1.5. Cinética de segundo orden

Las reacciones de segundo orden del tipo se describen a continuación:

Dos reactivos diferentes: estequiometría y concentraciones iniciales.

A + rB → productos

i) a b --

t) [a-x] [b-r x]

$$-\frac{d[A]}{dt} = \frac{1}{r} \frac{d[B]}{dt} ; -\frac{d[a-x]}{dt} = \frac{1}{r} \frac{d[b-rx]}{dt}$$

$$-\frac{d[a-x]}{dt} = \frac{dx}{dt} = K[a-x][b-rx] ; \int_0^x \frac{dx}{[a-x][b-rx]} = \int_0^t K dt$$

Operando, queda (separación en fracciones simples)<sup>8</sup>:

$$\frac{1}{[b-ra]} \left[ \ln \left( \frac{a}{a-x} \right) - \ln \left( \frac{b/r}{b/r-x} \right) \right] = Kt$$

Tabla II. **Ecuaciones cinéticas en forma diferencial como integral para distintos sistemas químicos**

Orden	Ecuación cinética diferencial	Ecuación cinética integral
0	$\frac{dx}{dt} = k$	$Kt = x$
1	$\frac{dx}{dt} = k(a-x)$	$kt = \ln \frac{a}{a-x}$
2	$kt = \frac{x}{a(a-x)}$	$kt = \frac{x}{a(a-x)}$

<sup>8</sup> LEVENSPIEL, Octave. *Ingeniería de las reacciones químicas*. p.189.

Continuación de tabla II.

3	$\frac{dx}{dt} = k(a-x)^3$	$kt = \frac{1}{2} \frac{2ax - x^2}{a^2(a-x)^2}$
Ecuación	Ecuación diferencial	Ecuación integral
A + B $\square$ productos	$\frac{dx}{dt} = k(a-x)(b-x)$	$kt = \frac{1}{b-a} \ln \frac{a(b-x)}{b(a-x)}$
A + 2B $\square$ productos	$\frac{dx}{dt} = k(a-x)(b-2x)$	$kt = \frac{1}{b+2a} \ln \frac{a(b-2x)}{b(a-2x)}$
A + B + C $\square$ productos		$kt = \frac{1}{(a-b)(b-c)(c-a)} \ln \left( \frac{a-x}{a} \right)^{b-c} \left( \frac{b-x}{b} \right)^{c-a} \left( \frac{c-x}{c} \right)^{a-b}$

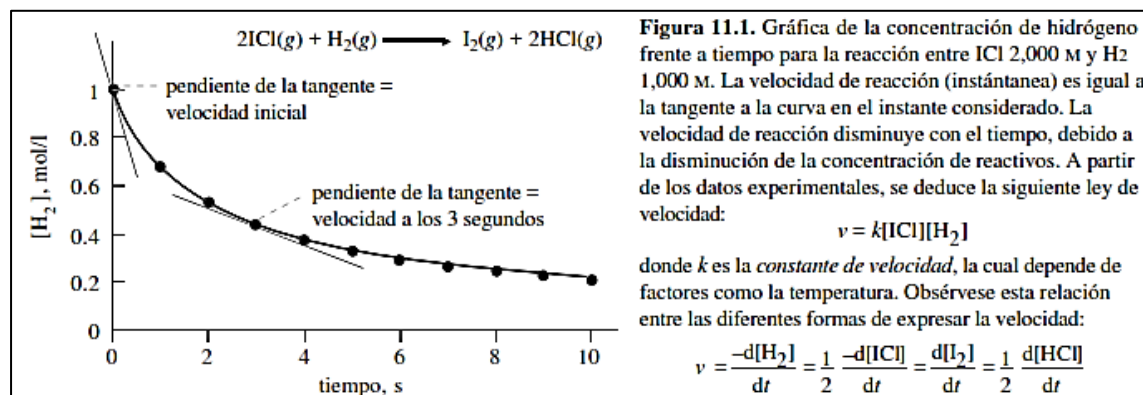
Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de Ingeniería de las reacciones químicas*. p. 312.

Tabla III. **Ecuaciones cinéticas en forma diferencial como integral para distintos sistemas**

Equilibrio	Ecuación cinética	Tiempo de relajación
A $\xrightleftharpoons[k_{-1}]{k_1}$ B	$\frac{dx}{dt} = k_1(a_0 - x) - k_{-1}(b_0 + x)$	$\frac{1}{k_1 + k_{-1}}$
A + B $\xrightleftharpoons[k_{-1}]{k_1}$ C	$\frac{dx}{dt} = k_1(a_0 - x)(b_0 - x) - k_{-1}(c_0 + x)$	$\frac{1}{k_1(a_c + b_c) + k_{-1}}$
A $\xrightleftharpoons[k_{-1}]{k_1}$ 2C	$\frac{dx}{dt} = k_1 \left( a_0 - \frac{x}{2} \right) - k_{-1}(c_0 + x)^2$	$\frac{1}{\frac{1}{2}k_1 - 2k_{-1}c_c}$
A + B $\xrightleftharpoons[k_{-1}]{k_1}$ C + D	$\frac{dx}{dt} = k_1(a_0 - x)(b_0 - x) - k_{-1}(c_0 + x)(d_0 + x)$	$\frac{1}{k_1(a_c + b_c) + k_{-1}(c_c + d_c)}$

Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de Ingeniería de las reacciones químicas*. p. 355.

Figura 3. Ejemplo de velocidad de reacción



Fuente: ATKINS, Julio. *Química física*. p. 512.

### 1.1.6. El orden de reacción

Un reactivo es el exponente de su término de concentración en la ley velocidad. El orden de reacción global es la suma de los exponentes de todos los términos de concentración.

Tabla IV. **Leyes de velocidad y órdenes de algunas reacciones químicas**

Tabla 11.1. Leyes de velocidad y ordenes de algunas reacciones químicas		
Reacción	Ley de velocidad	Órdenes de reacción
$2\text{N}_2\text{O}_5(\text{g}) \longrightarrow 4\text{NO}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$	$v = \frac{-d[\text{N}_2\text{O}_5]}{dt} = k[\text{N}_2\text{O}_5]$	Primer orden
$2\text{NO}_2(\text{g}) \longrightarrow 2\text{NO}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$	$v = \frac{-d[\text{NO}_2]}{dt} = k[\text{NO}_2]^2$	Segundo orden
$\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \longrightarrow 2\text{HI}(\text{g})$	$v = \frac{-d[\text{H}_2]}{dt} = k[\text{H}_2][\text{I}_2]$	Segundo orden { Primer orden para $\text{H}_2$ Primer orden para $\text{I}_2$
$\text{CHCl}_3(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g}) \longrightarrow \text{CCl}_4(\text{g}) + \text{HCl}(\text{g})$	$v = \frac{-d[\text{CHCl}_3]}{dt} = k[\text{CHCl}_3][\text{Cl}_2]^{1/2}$	Orden $1^{1/2}$ { Primer orden para $\text{CHCl}_3$ Orden $1/2$ para $\text{Cl}_2$
$2\text{O}_3(\text{g}) \longrightarrow 3\text{O}_2(\text{g})$	$v = \frac{-d[\text{O}_3]}{dt} = k[\text{O}_3][\text{O}_2]^{-1}$	Orden cero { Primer orden para $\text{O}_3$ Orden $-1$ para $\text{O}_2$
$2\text{NH}_3(\text{g}) \xrightarrow{\Delta, \text{Pt}} \text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g})$	$v = \frac{-d[\text{NH}_3]}{dt} = k$	Orden cero

Fuente: ATKINS, Julio. *Química física*. p. 545.

Para calcular la concentración de reactivo que quedará transcurrido un tiempo o el necesario para que determinada cantidad de reactivo se consuma, es útil integrar la ecuación de velocidad (tabla VI). La vida media  $t_{1/2}$ , de un reactivo es el tiempo necesario para que su concentración pase a ser la mitad del valor inicial. Para una reacción de primer orden, la vida media no depende la concentración del reactivo.

Tabla V. **Velocidades de reacción de acuerdo a la orden**

Tabla 11.2. Formas integradas de las leyes de velocidad			
Orden	Ley de velocidad	Forma integrada	Vida media
0	$v = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]^0 = k$	$[A] = [A]_0 - kt$	
1	$v = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]$	$\ln \frac{[A]}{[A]_0} = -kt$	$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$
2	$v = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]^2$	$\frac{1}{[A]} = \frac{1}{[A]_0} + kt$	$t_{1/2} = \frac{1}{k[A]_0}$
3	$v = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]^3$	$\frac{1}{[A]^2} = \frac{1}{[A]_0^2} + 2kt$	
$n > 1$	$v = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]^n$	$\frac{1}{[A]^{n-1}} = \frac{1}{[A]_0^{n-1}} + (n-1)kt$	$[A] = \text{concentración de reactivo a tiempo } t$ $[A]_0 = \text{concentración inicial de reactivo}$

Fuente: ATKINS, Julio. *Química física*. p. 561.

### **1.1.7. Mecanismos de reacción**

El objetivo fundamental de la cinética de reacciones es la investigación del mecanismo por el cual transcurre una determinada reacción. Todos los problemas cinéticos tienen un doble aspecto. En primer lugar, se trata de estudiar la reacción desde un punto de vista experimental para hallar la ecuación cinética a la que responde la velocidad. Esta ecuación da las especies químicas cuya concentración influye en la velocidad. En segundo lugar, plantea un mecanismo (es decir, un sistema de ecuaciones diferenciales), cuya solución lleve a la ecuación cinética hallada experimentalmente. Entonces, el mecanismo propuesto es compatible con los datos experimentales.

#### **1.1.7.1. Teoría de las colisiones**

Esta teoría se deriva de la teoría cinético molecular, propone que para que pueda producirse una reacción química entre átomos, iones o moléculas, es preciso que estos experimenten primeramente colisiones. Según esta teoría, la velocidad de la reacción dependerá de:

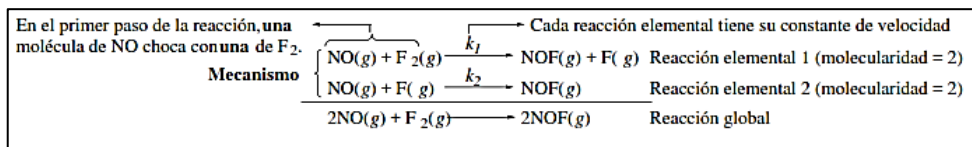
- La frecuencia de los choques: concentración, estado de los reactivos, temperatura (velocidad).
- La frecuencia de los choques con orientación adecuada: naturaleza de los reactivos, entre otros.
- La frecuencia de los choques con energía suficiente para llegar al estado de transición: temperatura.

La mayoría de reacciones transcurren por mecanismos de varias etapas llamadas reacciones elementales. La ecuación elemental indica la



molecularidad (número de partículas que colisionan) de los reactivos implicados en el choque que produce la reacción.

Figura 4. **Explicación de un mecanismo de reacción**



Fuente: ATKINS, Julio. *Química física*. p. 572.

### 1.1.8. Molecularidad y orden de reacción

Se puede predecir que la ley de velocidad para una reacción elemental (no global) viene dada por el producto de la constante de velocidad por las concentraciones de los reactivos en esa etapa. Es decir, en una reacción elemental, orden y molecularidad coinciden.

Figura 5. **Explicación molecularidad y orden de reacción**

<i>Etapa Elemental</i>	<i>Molecularidad</i>	<i>Ley de velocidad</i>	Proportional al número de choques por unidad de tiempo	Los procesos de molecularidad mayor de tres son muy escasos, ya que es muy poco probable que 4 o más partículas del tipo adecuado colisionen con la orientación y energía adecuadas al mismo tiempo.
A $\longrightarrow$ producto	unimolecular	$v = k [A]$		
A + B $\longrightarrow$ producto	bimolecular	$v = k [A][B]$		
A + A $\longrightarrow$ producto	bimolecular	$v = k [A]^2$		
2A + B $\longrightarrow$ producto	termolecular	$v = k [A]^2[B]$		

Choques eficaces por unidad de tiempo, cuando las concentraciones son la unidad

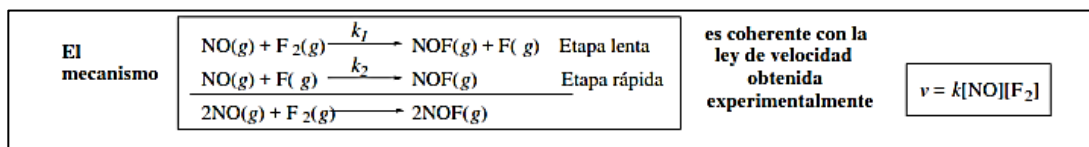
Fuente: ATKINS, Julio. *Química física*. p. 581.

### 1.1.9. Mecanismo y ley de velocidad

La etapa determinante de la velocidad en un mecanismo es la reacción elemental más lenta, pues gobierna la velocidad de la reacción global. De esta

forma se puede saber si un mecanismo propuesto para una reacción es o no coherente con la ley de velocidad experimental.

Figura 6. **Mecanismo y ley de velocidad. Etapa determinante de la velocidad**

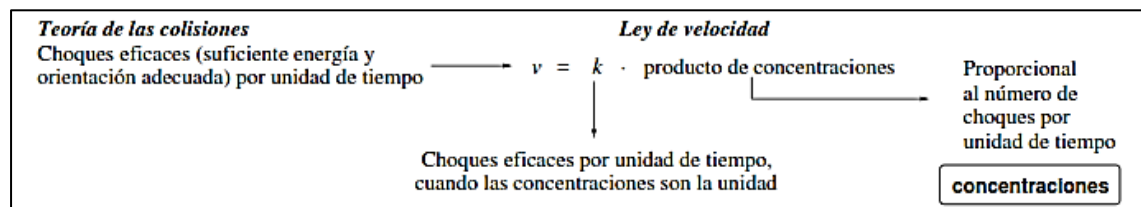


Fuente: ATKINS, Julio. *Química física*. p. 611.

### 1.1.10. Variación de la energía en el transcurso de una reacción

Teoría del estado de transición: vincula la cinética y termodinámica de reacción. Para reaccionar, las moléculas necesitan distorsionarse formando un complejo activado. La energía de activación,  $E_a$  es la que deben absorber los reactivos para alcanzar el estado activado.

Figura 7. **Explicación de energía de activación**



Fuente: FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. p. 356.

En una reacción de varias etapas, cada una tiene un complejo activado y su barrera de activación.

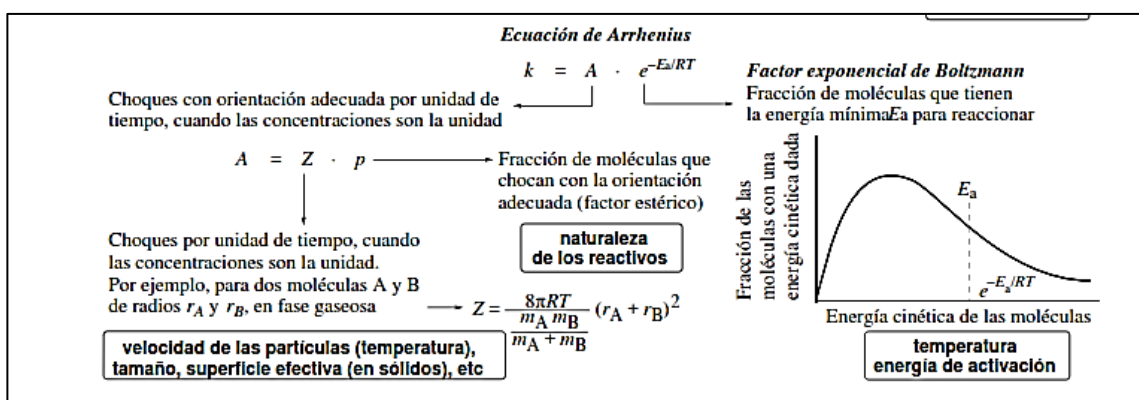
### 1.1.11. La ecuación de Arrhenius

La velocidad de una reacción aumenta al elevar la temperatura. Mediante observaciones experimentales, Arrhenius obtuvo una relación matemática entre la constante de velocidad y la temperatura.

$$K = A e^{-E_a/RT}$$

Donde A es una constante que depende de la reacción (ver figura 8). La teoría de colisiones permite deducir teóricamente la ecuación de Arrhenius y darle un sentido físico.

Figura 8. Explicación de la ecuación de Arrhenius con respecto a la variación de la energía en el transcurso de una reacción



Fuente: LEVENSPIEL, Octave. *Ingeniería de las reacciones químicas*. p. 215.

## **1.2. Reactores químicos**

La ingeniería de reactores pretende realizar el diseño más adecuado, con una metodología independiente del tamaño y reacción que se lleva a cabo.

### **1.2.1. Generalidades**

Un reactor químico es un equipo en cuyo interior tiene lugar una reacción química, (proceso mediante el cual una sustancia química se transforma en otra diferente); estando este diseñado para maximizar la conversión y selectividad de la misma con el menor coste posible. Si la reacción química es catalizada por una enzima purificada o por el organismo que la contiene, se habla de biorreactores. El diseño de un reactor químico requiere conocimientos de termodinámica, cinética química, transferencia de masa y energía, así como de mecánica de fluidos; balances de materia y energía son necesarios. Por lo general, se busca conocer el tamaño y tipo de reactor, así como el método de operación, además, con base en los parámetros de diseño se espera predecir con cierta certidumbre la conducta de un reactor ante ciertas condiciones, por ejemplo, un salto en escalón en la composición de entrada.

Los reactores químicos tienen como funciones principales:

- Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del tanque, para conseguir una mezcla deseada con los materiales reactantes.
- Proporcionar el tiempo suficiente de contacto entre las sustancias y con el catalizador, para conseguir la extensión deseada de la reacción.

- Permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción<sup>9</sup>.

### 1.2.2. Clasificación

Existen infinidad de tipos de reactores químicos y cada uno responde a las necesidades de una situación en particular; entre los tipos más importantes, más conocidos, y mayormente utilizados en la industria se pueden mencionar los siguientes:

- Reactor discontinuo: es aquel en donde no entra ni sale material durante la reacción, sino más bien, al inicio del proceso se introduce los materiales, se lleva a las condiciones de presión y temperatura requeridas, y se deja reaccionar por un tiempo preestablecido, luego se descargan los productos de la reacción y los reactantes no convertidos. También es conocido como reactor tipo *Batch*.
- Reactor continuo: mientras tiene lugar la reacción química al interior del reactor, este se alimenta constantemente de material reactante, y también se retira ininterrumpidamente los productos de la reacción.
- Reactor semicontinuo: es aquel en el cual inicialmente se carga de material todo el reactor, y a medida que tiene lugar la reacción, se va retirando productos y también incorporando más material de manera casi continua.
- Reactor tubular: es cualquier reactor de operación continua, con movimiento constante de uno o todos los reactivos en una dirección

---

<sup>9</sup> MORGAN y VESILIND. *Reactores químicos y moleculares*. p. 189.

espacial seleccionada, y en el cual no se hace ningún intento por inducir al mezclado. Tienen forma de tubos, los reactivos entran por un extremo y salen por el otro.

- Tanque con agitación continua: consiste en un tanque donde hay un flujo continuo de material reaccionante y desde el cual sale continuamente el material que ha reaccionado. La agitación del contenido es esencial, debido a que el flujo interior debe estar en constante circulación y así producir una mezcla uniforme.
- Reactor de lecho fluidizado: se utiliza para reacciones donde intervengan un sólido y un fluido (generalmente un gas). En estos reactores, la corriente de gas se hace pasar a través de las partículas sólidas, a una velocidad suficiente para suspenderlas. Con el movimiento rápido de partículas se obtiene un alto grado de uniformidad en la temperatura, evitando la formación de zonas calientes.
- Reactor de lecho fijo: consisten en uno o más tubos empacados con partículas de catalizador, que operan en posición vertical. Las partículas catalíticas pueden variar de tamaño y forma: granulares, cilíndricas, esféricas, entre otras. En algunos casos, especialmente con catalizadores metálicos como el platino, no se emplean partículas de metal, sino que este se presenta en forma de mallas de alambre. El lecho está constituido por un conjunto de capas de este material. Estas mallas catalíticas se emplean en procesos comerciales, por ejemplo, para la oxidación de amoníaco y para la oxidación del acetaldehído a ácido acético.

- Reactor de lecho con escurrimiento: en estos reactores, el catalizador sólido está presente como en el lecho fijo. Los reactivos se hacen pasar en corrientes paralelas o a contracorriente a través del lecho.
- Reactor de lecho de carga móvil: una fase fluida pasa hacia arriba a través de un lecho formado por sólidos. El sólido se alimenta por la parte superior del lecho, se mueve hacia debajo de la columna y se saca por la parte inferior.
- Reactor de burbujas: permiten hacer burbujear un reactivo gaseoso a través de un líquido con el que puede reaccionar, porque el líquido contiene un catalizador disuelto, no volátil u otro reactivo. El producto se puede sacar del reactor en la corriente gaseosa.
- Reactor con combustible en suspensión: son similares a los reactores de burbujeo, pero la fase líquida está formada por una suspensión de líquidos y partículas finas del catalizador sólido.
- Reactor de mezcla perfecta: en este las propiedades no se modifican ni con el tiempo ni con la posición, ya que se supone que se está trabajando en estado de flujo estacionario y la mezcla de reacción es completamente uniforme. El tiempo de mezcla tiene que ser muy pequeño en comparación con el tiempo de permanencia en el reactor. En la práctica se puede llevar a cabo siempre que la mezcla fluida sea poco viscosa y esté bien agitada
- Reactores de recirculación: pueden ser con dispositivo separador, cuando se toma parte de la corriente de salida y se llevan directamente a la entrada del reactor. sin dispositivo separador, cuando en la salida del

reactor se coloca un dispositivo separador que hace que se separen reactivos y productos, luego los reactivos se recirculan de nuevo al reactor.

- Reactores de membrana: son aquellos que combinan la reacción y la separación en una sola unidad; la membrana selectivamente remueve una (o más) de las especies reactantes o productos. Estos reactores han sido comúnmente usados para aplicaciones en las cuales los rendimientos de la reacción están limitados por el equilibrio. También han sido propuestos y usados para otras aplicaciones; para incrementar el rendimiento y la selectividad de reacciones enzimáticas y catalíticas influyendo a través de la membrana sobre la concentración de una o más especies intermedias, removiéndolas selectivamente (o ayudando a mantenerlas en una concentración baja), evitando la posibilidad de que dichos compuestos envenenen o desactiven el catalizador y para proveer una interfase controlada entre dos o más reactantes.
- Fermentadores: este tipo de reactores utilizan hongos, los cuales forman un cultivo, el cual a su vez se transforma en una sopa espesa que contiene crecimientos filamentosos. Un ejemplo se encuentra en la fabricación de antibióticos como la penicilina.
- Reactor *trickle bed*: supone la existencia de un flujo continuo de gas y otro de líquido hacia abajo sobre un lecho fijo de partículas sólidas catalíticas, las características de las partículas sólidas y de su empaquetamiento, junto con los caudales y propiedades de las dos corrientes de fluidos, determinarán el régimen de flujo del reactor y también sus propiedades fluido-dinámicas.



También se pueden mencionar los reactores isotérmicos, que son aquellos que trabajan u operan a una misma temperatura constante; y también los reactores isobáricos, aquellos que trabajan u operan a una misma presión constante<sup>10</sup>.





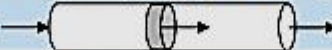

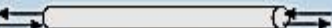

Los reactores pueden clasificarse según los siguientes criterios:

- Tipo de modelo de flujo: ideal al que tiende (mezcla perfecta, flujo de pistón) o real.
- Número de fases en contacto: homogénea (1 fase), heterogénea (2 fases=bifásica, 3 fases=trifásica, o multifásica).
- Modo de operación: continuo, semicontinuo, discontinuo.
- Evolución en el tiempo: régimen estacionario y régimen no estacionario
- Tipo de reacción química: catalítica, bioquímica, esterificación entre otros.

---

<sup>10</sup> MORGAN y VESILIND. *Reactores químicos y moleculares*. p. 197.

Figura 9. **Criterios para la clasificación de reactores**

Criterios	Tipos de reactor	Ejemplos industriales
Modo de tratamiento de la carga	Cerrado (sin intercambio de materia con el exterior) 	Química fina, polimerización en discontinuo
	Semicerrado (una parte de la carga es añadida o extraída en el curso de la reacción) 	Cloración orgánica de "pequeños productos"
	Abierto (la carga circula dentro del reactor) 	Intermediarios o productos básicos petroquímicos de gran tonelaje
Evolución en el tiempo	Régimen no estacionario	Operaciones discontinuas, puestas en marcha
	Régimen estacionario	Marcha continua de los reactores abiertos
Modelo de flujo ideal	Reactor prácticamente agitado (composición uniforme) 	Sulfonaciones, nitraciones, polimerizaciones
	Reactor de circulación en pistón (progresión en bloque) 	Reactores catalíticos en lecho fijo, reactores homogéneos en circulación turbulenta.
Puesta en contacto de las fases *	Co-corriente 	Hidrodesulfuración de las fracciones petrolíferas
	Contra-corriente 	Absorción y reacción química gas-líquido
	Corrientes cruzadas 	Combustión del carbón sobre soporte transportador

Fuente: CUNILL, Fidel; IBORRA, Montserrat. *Reactores químicos*. p. 51.

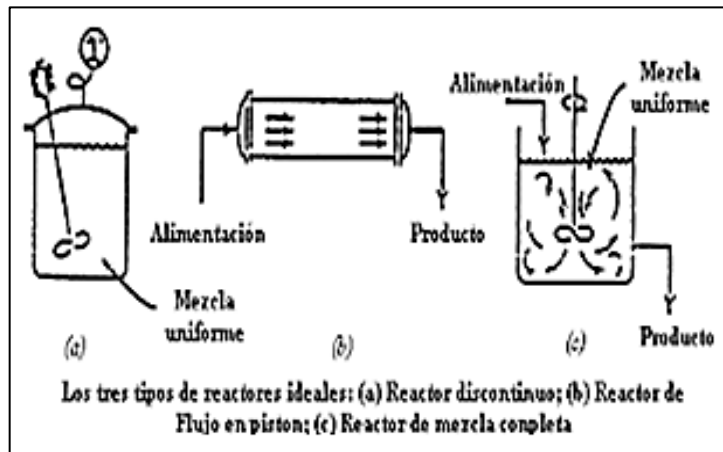
### 1.2.3. Reactores ideales

Un reactor se considera ideal si:

- Los reactantes están mezclados a la entrada del reactor, es decir, el tiempo de mezcla es cero y todo el volumen es útil para la reacción.
- No se forman agregados moleculares.
- Se sigue un modelo de flujo ideal: este tiene dos extremos de mezcla que representan la máxima mezcla posible y la inexistencia de la misma y

que constituyen los dos modelos de flujo ideales posibles; los cuales se representan en el esquema que se muestra en la figura 10:

Figura 10. **Tipos de reactores ideales**



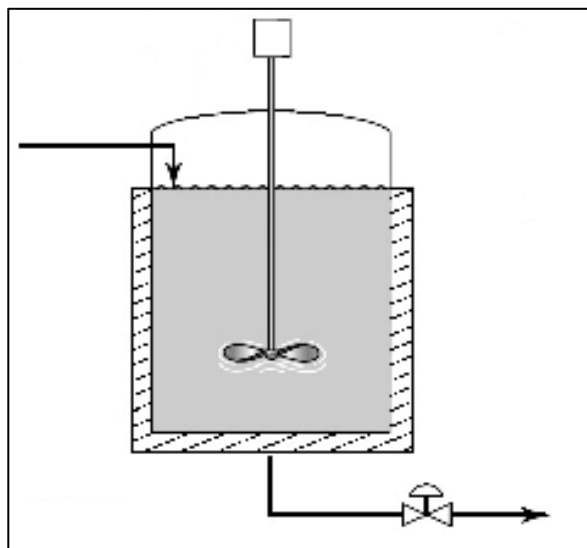
Fuente: CUNILL, Fidel; IBORRA, Montserrat. *Reactores químicos*. p. 57.

#### 1.2.4. **Reactores tipo *batch***

Son reactores donde no existe flujo de entrada ni de salida, es simplemente un reactor con un agitador que homogeniza la mezcla.

Las ventajas del reactor mienten con su flexibilidad. Un solo recipiente puede realizar una secuencia de diversas operaciones sin la necesidad de romper la contención. Esto es particularmente útil cuando se procesan herbicidas o componentes altamente potentes.

Figura 11. **Reactor tipo *batch***



Fuente: CUNILL, Fidel; IBORRA, Montserrat. *Reactores químicos*. p. 63.

Para entender un poco más estos reactores, se plantea la ecuación de balance de masa de la siguiente manera:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Tasa de materia} & & \text{tasa de materia} & & \text{tasa de materia} & & \text{Tasa de materia} \\ \\ \text{Acumulada} & = & \text{entrante} & - & \text{saliente} & + / - & \text{reaccionante} \end{array}$$

En un reactor *batch* no hay flujo de entrada, por lo tanto, los dos primeros términos de la ecuación son cero.

Los reactores *batch* trabajan en estado no estacionario y el más sencillo sería un tanque agitado. Este reactor tiene la ventaja de que su costo de instrumentación es bajo, además de ser flexible en su uso (se le puede detener de modo fácil y rápido). Tiene la desventaja de un elevado costo en su

funcionamiento y de mano de obra debido a la gran cantidad de tiempo que se pasa parado debido a la carga, descarga y limpieza. Además, no siempre es posible implementar un sistema de control adecuado. Este reactor suele usarse en pequeñas producciones o pruebas piloto. Asumiendo que en un reactor *batch* la composición es uniforme en cualquier instante y basándose en la selección de un componente limitante. Las ecuaciones de diseño para este tipo de reactor en estado estacionario se deducen de la siguiente forma (se toma como ejemplo la especie molar A):

$$\text{Entrada} - \text{salida} + \text{generación} - \text{consumo} = 0^1$$

$$0 - 0 + \text{generación} - \text{consumo} = 0$$

$$(-r_A V) - \frac{dN_A}{dt} = 0$$

Siendo V el volumen del fluido en el reactor y  $(-r_A)$  la velocidad de reacción para el componente limitante. Evaluando los términos de la ecuación anterior se puede calcular el tiempo de residencia necesario para alcanzar la conversión deseada.

$$(-r_A V) = \frac{dN_A}{dt}$$

$$(-r_A V) = N_{A0} \frac{dX_A}{dt}$$

$$\int_0^{X_A} \frac{N_{A0}}{-r_A V} dX = t$$

Donde X representa la conversión lograda y está relacionada con la concentración:

$$C_{A0} X_A = C_{A0} - C_A$$

X toma un valor entre 0 y 1

Para aquellas reacciones en las que el volumen de la mezcla cambia proporcionalmente a la conversión la ecuación se transforma en

$$t = \int_a^b \frac{N_{A0}}{-r_A V_A (1 + \varepsilon X_A)} dX$$

Siendo  $\varepsilon$  una constante representativa del cambio del volumen en relación con la conversión, en términos matemáticos:

$$\varepsilon = \frac{V_{x_A=1} - V_{x_A=0}}{V_{x_A=0}}$$

para cambios en otros componentes se tiene:

$$\varepsilon_A X_A = \varepsilon_B X_B$$

Aparte del tiempo de reacción, en un proceso industrial debe añadirse el tiempo de carga, descarga y limpieza para un este tipo de reactores y en general procesos en lotes.

El balance de energía para este tipo de reactor ofrece 3 posibilidades que dependen del modo de operación y de las exigencias de producción requeridas.

- Modo politrópico

$$m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = U \cdot A \cdot (T_{servicio} - T_{reactor}) + R \cdot -\Delta_r H \cdot V$$

- Modo isotérmico

$$0 = U \cdot A \cdot (T_{servicio} - T_{reactor}) + R \cdot -\Delta_r H \cdot V$$

- Modo adiabático<sup>11</sup>:

$$m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = R \cdot -\Delta_r H \cdot V$$

### 1.3. Torres de enfriamiento

La función de un sistema de enfriamiento es la de remover calor de un proceso o equipo. El calor removido de un medio es transferido a otro medio, que generalmente es agua.

#### 1.3.1. Generalidades

Las torres de enfriamiento son intercambiadores de calor que enfrían agua por medio de la evaporación. Este tipo de enfriadores se utiliza, en los condensadores industriales. Las torres de enfriamiento son usadas cuando los rangos de enfriamiento son bajos. La temperatura mínima que se puede alcanzar con una torre de enfriamiento es la temperatura de bulbo húmedo del aire circundante<sup>12</sup>.

Las torres de enfriamiento utilizan el calor latente de evaporación de los líquidos para enfriarlos. El proceso es fácilmente explicable de la siguiente manera:

- Cuando un líquido a cierta temperatura TL entra en contacto con un gas inerte a temperatura TG más baja que TL, la película de líquido que está

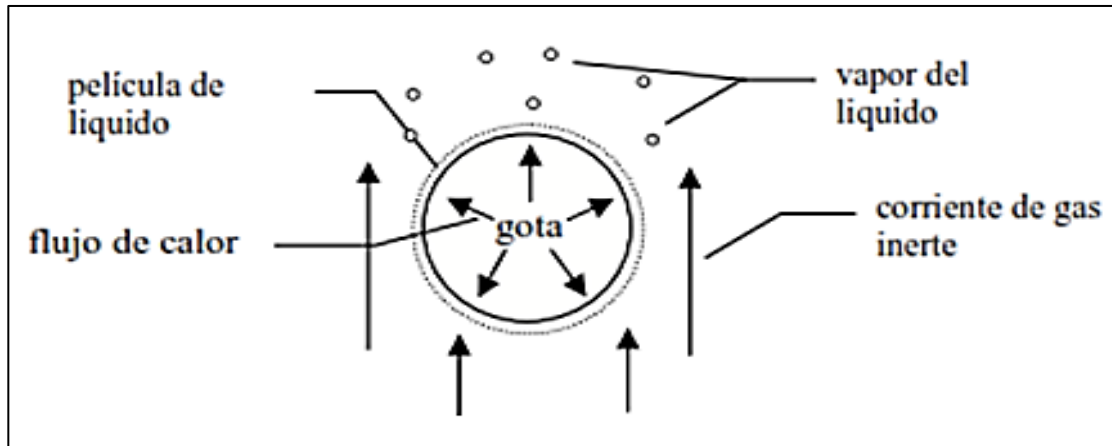
---

<sup>11</sup> LEVENSPIEL, Octave. *Ingeniería de las reacciones químicas*. p. 512.

<sup>12</sup> KERN, Donald. Q. *Procesos de transferencia de calor*. p. 313.

en contacto directo con el líquido se evapora. Para que este líquido pueda cambiar de fase, necesita obtener energía de algún lugar disponible; la fuente más cercana es el seno del líquido, así que al tomar esa energía baja la temperatura del líquido. Este es el principal proceso de los enfriadores por evaporación, tal como se muestra a continuación

Figura 12. **Esquema de enfriamiento por evaporación**



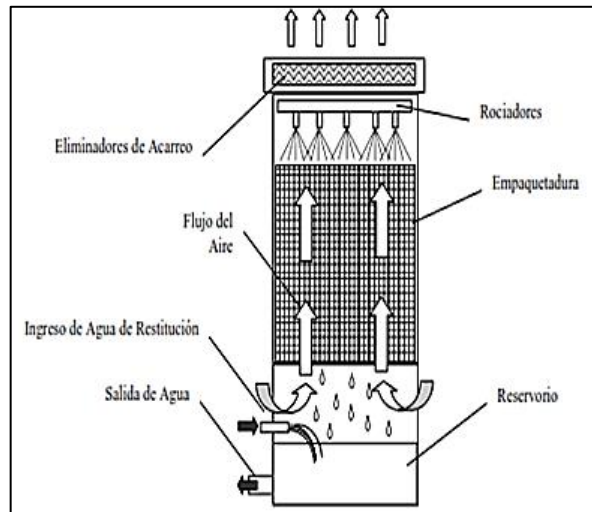
Fuente: IÑIGUEZ DONOSO, Jorge Antonio. *Cálculo y diseño de empaquetadura y ventiladores para una torre de enfriamiento de tiro forzado*. p. 1.

El agua que se pierde por evaporación dentro de una torre de enfriamiento generalmente no llega al 3 % del total<sup>13</sup>. Las torres de enfriamiento tal como se muestra a continuación poseen las siguientes partes constitutivas:

<sup>13</sup> VAN WYLEN, Gordon. *Fundamentos de termodinámica*. p. 218.



Figura 13. Partes de una torre enfriamiento



Fuente: IÑIGUEZ DONOSO, Jorge Antonio. *Cálculo y diseño de empaquetadura y ventiladores para una torre de enfriamiento de tiro forzado*. p. 2.

- **Cuerpo:** es la estructura que le da forma a la torre y puede ser metálica, de madera incorruptible o de hormigón.
- **Los rociadores:** se encuentran en la parte superior de la torre y permiten que el agua caliente ingrese a la torre en forma de gotas para aumentar su superficie de contacto.
- **Empaquetadura:** es una estructura que se encuentra en el interior de la torre y puede ser metálica, plástica o de madera. Su función es obligar a que el agua que cae en forma de gotas permanezca la mayor cantidad de tiempo dentro del cuerpo de la torre, a fin de garantizar una óptima transferencia de calor. Así también, ayuda a que el flujo de aire se distribuya uniformemente en el interior del cuerpo.
- **Reservorio:** se encuentra en el fondo de la torre y es un tanque en el cual se recoge el agua enfriada para regresar nuevamente al sistema.

- Eliminadores de acarreo: es una estructura ubicada en la parte superior de la torre y tiene la finalidad de evitar que las gotas pequeñas sean arrastradas por la corriente de aire fuera del sistema.
- Tubería de restitución del agua: conforme se produce la evaporación del agua es necesario ir restituyéndola, para este propósito existe una tubería que mantiene el nivel del reservorio constante.
- Balance de calor en una torre de enfriamiento: al proceso que ocurre en el interior de la torre normalmente se le conoce como proceso de transferencia de masa y se basa en la siguiente ecuación:

$$q + L_o C T_o = G (H_2 - H_1)$$

Donde

$q$  = cantidad total de calor extraída del agua

$L_o$  = calor latente de vaporización del agua

$C$  = calor específico del agua

$T_o$  = temperatura de ingreso del agua

$G$  = cantidad de aire que circula por el interior de la torre

$H_1$  y  $H_2$  = entalpías del aire que entra y sale de la torre, respectivamente

La ecuación anterior se podría evaluar fácilmente, sino fuera porque el valor de  $H_2$  no se puede calcular teóricamente. Esto se debe a que no se puede predecir las condiciones de salida del aire en la torre, eso depende de la geometría de la empaquetadura y se mide como el factor de transferencia  $K_{xa}$ .

El factor  $K_{xa}$  depende de la superficie de contacto en el interior de la empaquetadura, es decir, mientras mayor sea el área de contacto efectiva entre el aire y el agua, el  $K_{xa}$  de la torre será mayor<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> KERN, Donald. Q. *Procesos de transferencia de calor*. p. 318.

Los valores de  $K_{xa}$  dependen del tipo de empaquetadura de la torre y es difícil encontrar información bibliográfica al respecto, eso se debe principalmente, a que es un factor clave de diseño que las compañías constructoras guardan celosamente<sup>15</sup>.

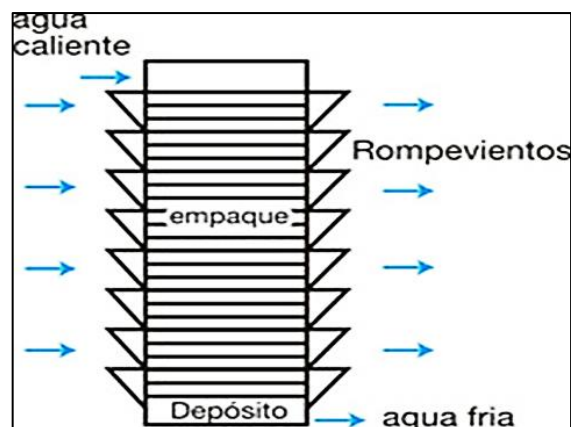
### 1.3.2. Tipos de torres de enfriamiento

Con relación al tipo de mecanismo utilizado para la transferencia de calor, los principales tipos son:

#### 1.3.2.1. Torres de circulación natural

- Atmosféricas: el movimiento del aire depende del viento y del efecto aspirante de los aspersores. Se utiliza en pequeñas instalaciones. Depende de los vientos predominantes para el movimiento del aire.

Figura 14. Torre de tiro natural atmosférica

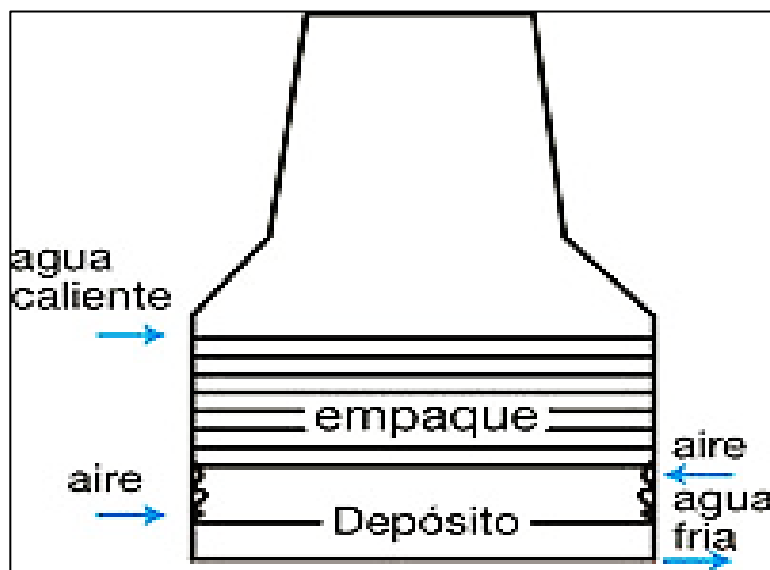


Fuente: KAPLAN, Robert; NORTON, David. *Alignment*. p. 149.

<sup>15</sup> IÑIGUEZ DONOSO, Jorge Antonio. *Cálculo y diseño de empaquetadura y ventiladores para una torre de enfriamiento de tiro forzado*. p. 2.

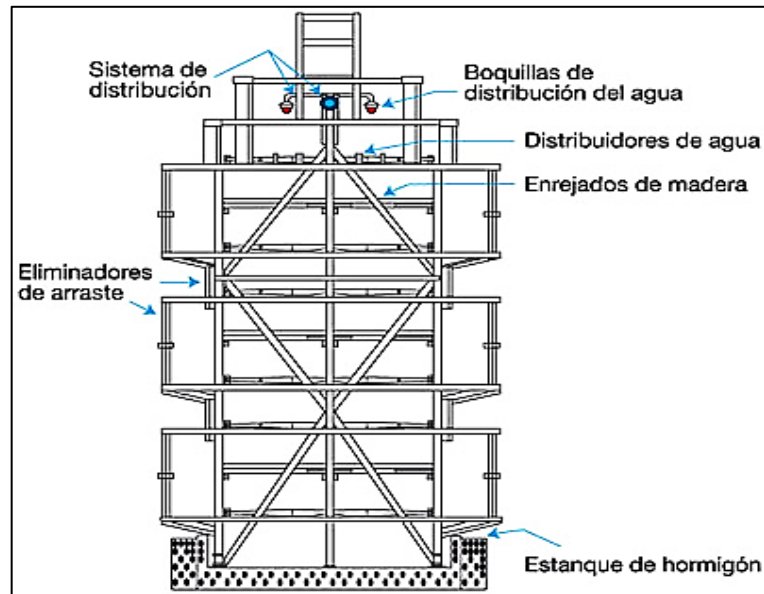
- Tiro natural: el flujo del aire necesario se obtiene como resultado de la diferencia de densidades, entre el aire más frío del exterior y húmedo del interior de la torre. Utilizan chimeneas de gran altura para obtener el tiro deseado. Debido a las grandes dimensiones de estas torres se utilizan flujos de agua de más de 200 000 gpm. Es muy utilizado en las centrales térmicas. A continuación, en la figura 15 se muestra el funcionamiento de una torre de enfriamiento con tiro natural:

Figura 15. **Torre de enfriamiento de tiro natural I**



Fuente: KAPLAN, Robert; NORTON, David. *Alignment*. p. 151.

Figura 16. **Torre de enfriamiento de tiro natural II**



Fuente: KERN, Donald. Q. *Procesos de transferencia de calor*. p. 321.

- Torres de tiro mecánico: el agua caliente que llega a la torre es rociada mediante aspersores que dejan pasar hacia abajo el flujo del agua a través de unos orificios. El aire utilizado en la refrigeración del agua es extraído de la torre de cualquiera de las formas siguientes:
- Tiro inducido: el aire se succiona a través de la torre mediante un ventilador situado en la parte superior de la torre. Son las más utilizadas. A continuación, en la figura 17 se muestra el funcionamiento de las torres de tiro inducido.

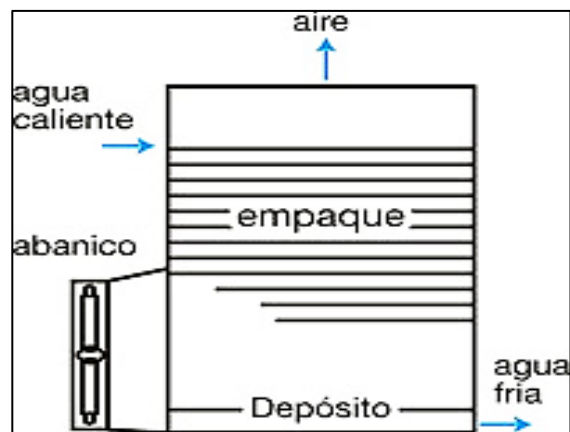
Figura 17. **Torre de enfriamiento de tiro inducido**



Fuente: KAPLAN, Robert; NORTON, David. *Alignment*. p. 157..

- Tiro forzado: el aire es forzado por un ventilador situado en la parte inferior de la torre y se descarga por la parte superior. A continuación, en la figura 18 se muestra el funcionamiento de las torres de tiro forzado.

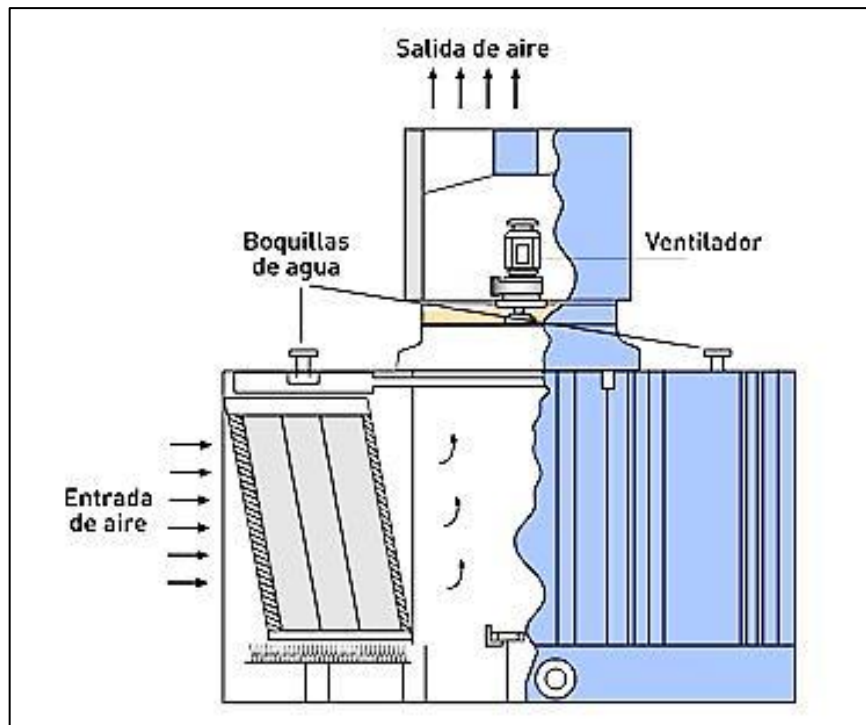
Figura 18. **Torre de tiro forzado**



Fuente: KAPLAN, Robert; NORTON, David. *Alignment*. p. 163.

- Torres de flujo cruzado. El aire entra por los lados de la torre fluyendo horizontalmente a través del agua que cae. Estas torres necesitan más aire y tienen un coste de operación más bajo que las torres a contracorriente. A continuación, en la figura 19 se muestra el funcionamiento de las torres de flujo cruzado.

Figura 19. **Torre de enfriamiento de flujo cruzado**



Fuente: KERN, Donald. Q. *Procesos de transferencia de calor*. p. 327.

### 1.3.3. Torres de enfriamiento de tiro forzado

Toda torre de enfriamiento de agua o condensador evaporativo incluye algún tipo de tiro mecánico, los distintos fabricantes no siempre instalan los distintos componentes de la misma manera. La colocación del ventilador, por

ejemplo de flujo axial, puede realizarse induciendo un vacío en el plenum de la torre o forzando el ingreso del aire desde un lateral. A simple vista, inspeccionando las distintas unidades, no parecen diferir mucho, suponiendo que los materiales de construcción empleados sean equivalentes. Sin embargo, existen torres de enfriamiento con vida útil comprobable de 20-25 años y torres de enfriamiento, cuya vida útil, térmica y materialmente hablando, no supera los 2 años.

La alternativa de tiro forzado simplemente perpetúa disfunciones térmicas estructurales inaceptables en contextos contemporáneos, tanto del punto de vista térmico (déficits del orden de 20-30 % o más) como del punto de vista de costos operativos (del orden de 1 a 3)<sup>16</sup>.

Por las características inherentes al diseño de la torre de tiro forzado, la descarga de aire vertical está necesariamente limitada por la velocidad vertical admisible a través del relleno, típicamente entre 300 fpm y 600 fpm. Esta velocidad de descarga contrasta con la velocidad de ingreso de aire a la torre, por ejemplo, valores cercanos a 1500 – 1700 fpm.

Como resultado de esta decisión de diseño/fabricación, se plantean para las unidades de tiro forzado, en principio, cuatro situaciones estructurales indeseables:

- Una baja velocidad de descarga vertical.
- Una alta velocidad de ingreso, por ejemplo, 2,5 veces la velocidad de descarga.
- Como resultado de 1 y 2, aumento significativo de instancias de recirculación y resultante colapso del rendimiento térmico prometido.

---

<sup>16</sup> KERN, Donald. Q. *Procesos de transferencia de calor*. p. 330.



- Un exacerbado aumento de ingreso de partículas y polvos, frecuentemente presentes en ambientes industriales, debido a la comparativamente “violenta” aspiración de la unidad.

El diseño de torre de tiro forzado, y en cierta medida el condensador evaporativo de igual diseño, debe mantener una velocidad de descarga lo más alta posible, se quiere evitar o minimizar el altísimo riesgo de recirculación que por las características inherentes autogenera. Lamentablemente, esto acarrea de facto, configurar una velocidad de descarga vertical simultáneamente acotada por la velocidad permisible a través del relleno. El resultado, cualquiera sea el compromiso elegido, es una velocidad de descarga extremadamente baja con alto riesgo de autosaturación del entorno/aire de alimentación y una velocidad a través del relleno próxima a los límites superiores recomendados con el correspondiente excesivo aumento de la caída de presión a través del mismo y consecuente aumento del *brake horsepower* de la unidad.

El déficit involucrado puede oscilar entre valores cercanos al 20 % y hasta más del 40 % según los casos.

Un pequeño aumento en la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada, por ejemplo de 2 °F, desde 78 a 80 °F involucra una reducción de capacidad térmica de la torre de enfriamiento del 16 %. Esto se traduce en un aumento de la temperatura de salida del agua fría de 1,5 °F<sup>17</sup>.

#### **1.4. Psicometría**

Es el estudio de las propiedades termodinámicas del aire húmedo y el uso de estas propiedades, para analizar condiciones y procesos que involucran aire

---

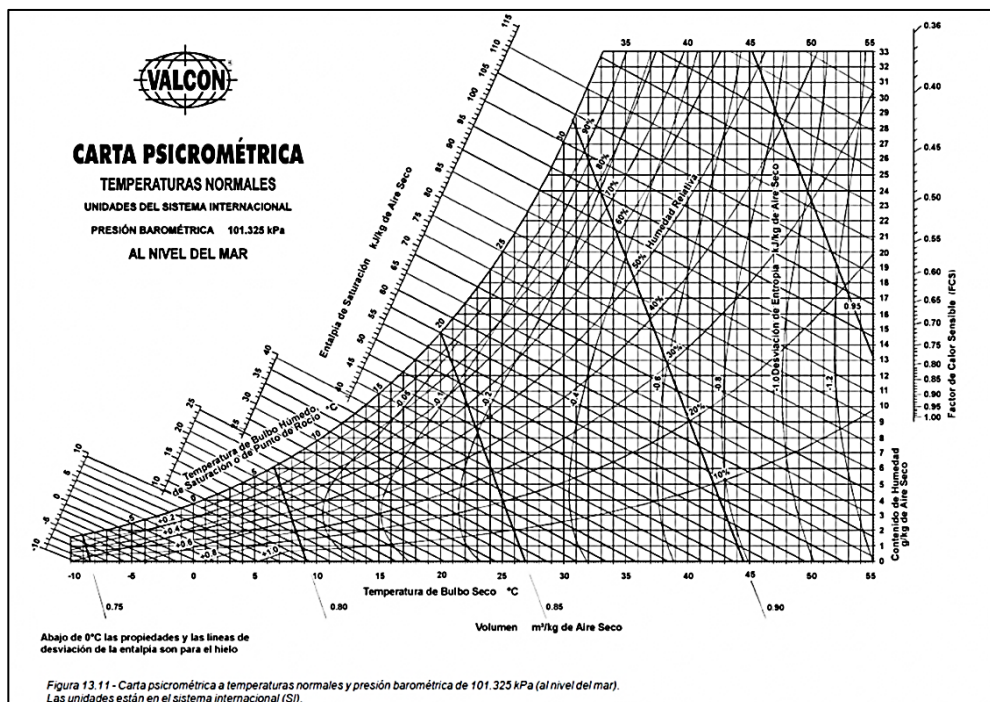
<sup>17</sup> Fuente: KERN, Donald. Q. *Procesos de transferencia de calor*. p. 337.

húmedo. Es importante en el estudio del aire húmedo atmosférico y sus efectos la ingeniería de diseño.

Se adjuntará como manera demostrativa el uso de la carta psicrométrica que se utiliza para encontrar temperaturas de bulbo húmedo, entalpías, punto de rocío.

El aire es una mezcla de gases y vapor de agua. La cantidad de vapor de agua en el aire varía dependiendo de la localidad y las condiciones climatológicas prevalecientes.

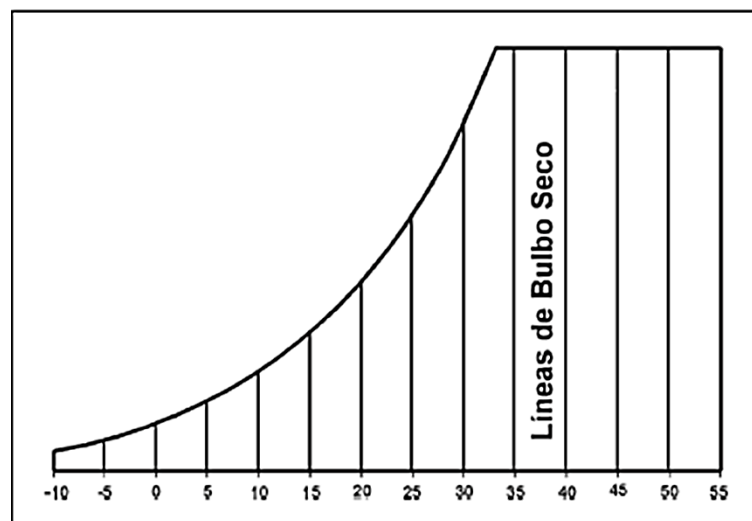
Figura 20. Carta psicrométrica



Fuente: PERRY, Robert. *Manual del ingeniero químico*. p. 12.

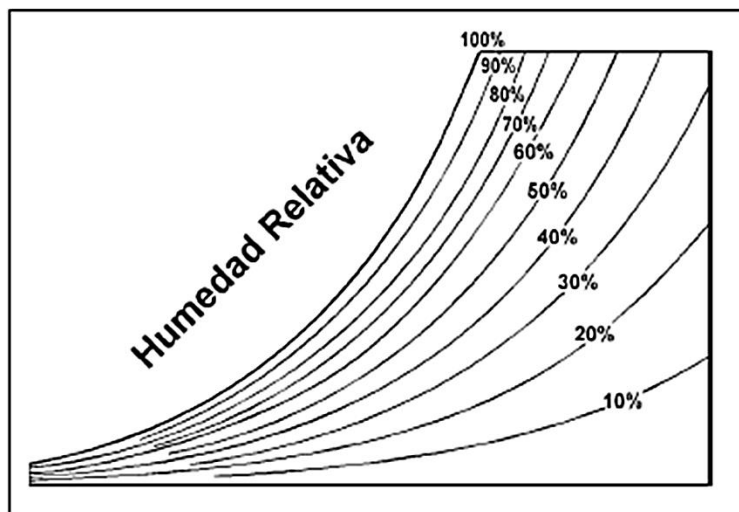
La carta psicrométrica es un diagrama de doble entrada, en el que se relacionan múltiples parámetros referentes a una mezcla de aire húmedo: temperatura, humedad relativa, humedad absoluta, punto de rocío, entalpía específica o calor total, calor sensible, calor latente y volumen específico del aire. Cada una de estas variables están individualmente definidas en cada una de las gráficas que se muestran a continuación:

Figura 21. **Líneas de bulbo seco**



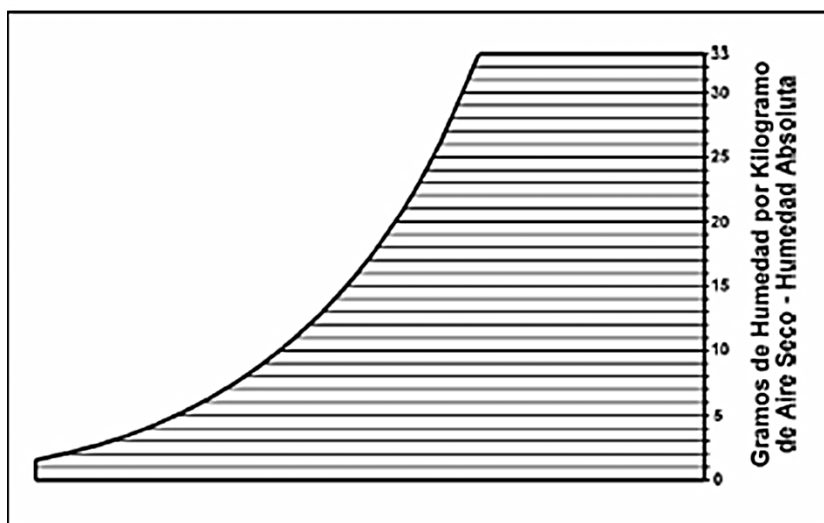
Fuente: PERRY, Robert. *Manual del ingeniero químico*. p. 14.

Figura 22. **Lineas de humedad relativa**



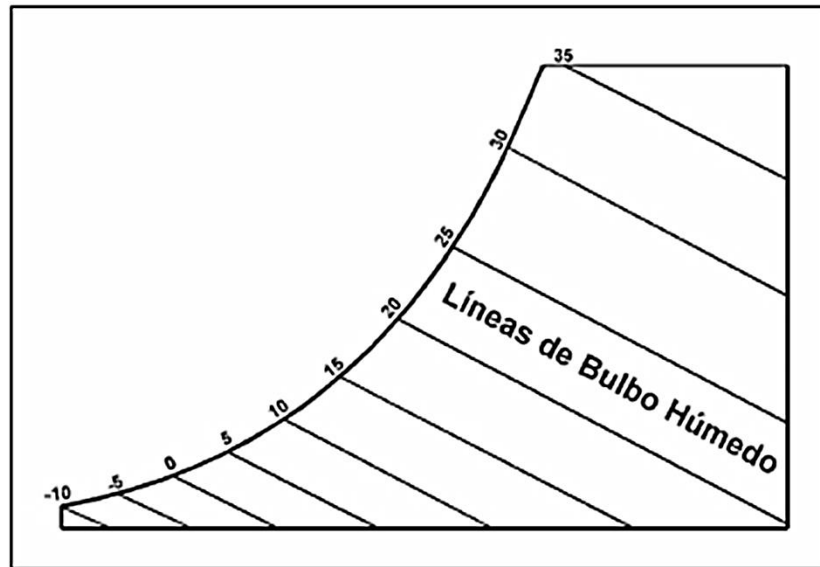
Fuente: PERRY, Robert. *Manual del ingeniero químico*. p. 14.

Figura 23. **Líneas humedad absoluta**



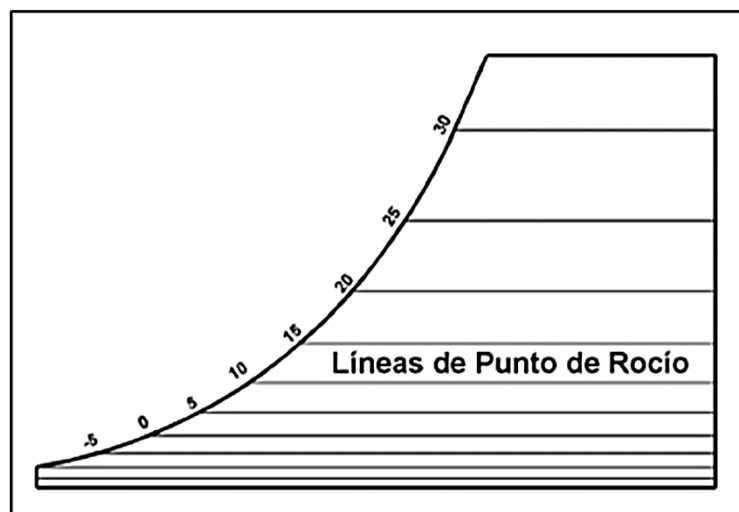
Fuente: PERRY, Robert. *Manual del ingeniero químico*. p. 17.

Figura 24. **Líneas de bulbo húmedo**



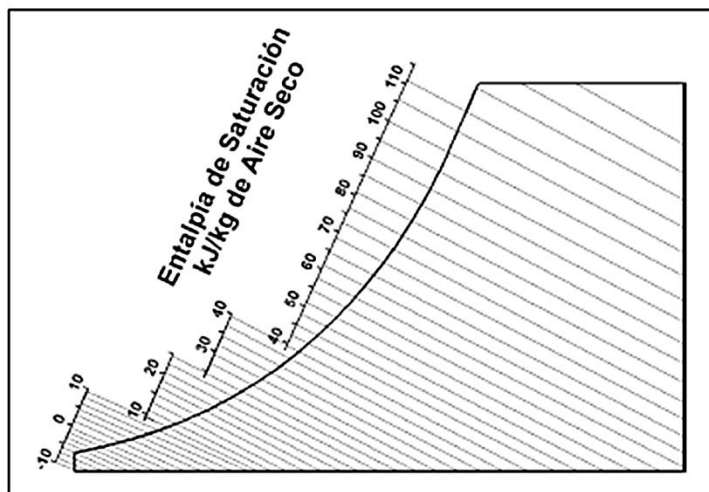
Fuente: PERRY, Robert. *Manual del ingeniero químico*. p. 17.

Figura 25. **Líneas de punto de rocío**



Fuente: PERRY, Robert. *Manual del ingeniero químico*. p. 19.

Figura 26. **Líneas de entalpía**



Fuente: PERRY, Robert. *Manual del ingeniero químico*. p. 20.

## **2. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **2.1. Delimitación del campo de estudio**

El objetivo de la investigación se centra en el diseño de un reactor *batch* para la elaboración de herbicidas, el cual se realiza en una empresa formuladora de agroquímicos.

- Geográfica: la investigación se realizará en la ciudad de Guatemala.
- Temporal: el tiempo estimado para llevar a cabo la investigación es de 6 meses.
- Universo y muestra
  - Universo: la población en la cual se pretende aplicar los resultados es una planta productora de herbicidas líquidos XYZ ubicada en San Miguel Petapa, Guatemala
  - Muestra: debido a que el presente estudio es de diseño, el tipo de muestreo será puntual.

### **2.2. Recursos**

Se utilizó un conjunto de elementos, los cuales aportaron información necesaria para el desarrollo de dicho estudio, estos se describen a continuación:

- Humanos
  - Estudiante: Francisco Javier Granados Morales
  - Asesor: MSc. Ing. Irma Odette Peláez Sánchez
- Institucionales
  - Planta formuladora de herbicidas líquidos XYZ ubicada en San Miguel Petapa, Guatemala
- Materiales y equipo: lista de los materiales a utilizar
  - Computadora
  - Laboratorio fisicoquímico
  - Resultados obtenidos de tesis<sup>18</sup> (Chajón Ramirez, 2014)

---

<sup>18</sup> Chajón Ramirez, F. J. *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius.* p. 91.



### 3. TÉCNICAS Y MÉTODOS

#### 3.1. Obtención de datos

El método de investigación seleccionado será de tipo mixto. Cualitativo y cuantitativo. Cualitativo: porque se considerarán aspectos basados en diseño de equipo y cuantitativo, ya que se estarán evaluando propiedades fisicoquímicas, termodinámicas y cinéticas del glifosato.

Para la presente estudio se utilizarán datos físicos y fisicoquímicos obtenidos a escala laboratorios por (Chajón Ramirez, 2014) y datos obtenidos a escala industrial en la planta XYZ en cuestión. A continuación se presentan los datos

Tabla VI. Consumo de reactivo limitante en el tiempo

Tiempo (min)	CA (mol/l)
0	2,11
2	0,22
5	0,08
8	0,05
10	0,04
21	0,02
40	0,01
60	0

Fuente: CHAJÓN RAMIREZ, F. J. *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius.* p. 95.

Figura 27. Consumo de reactivo limitante en el tiempo



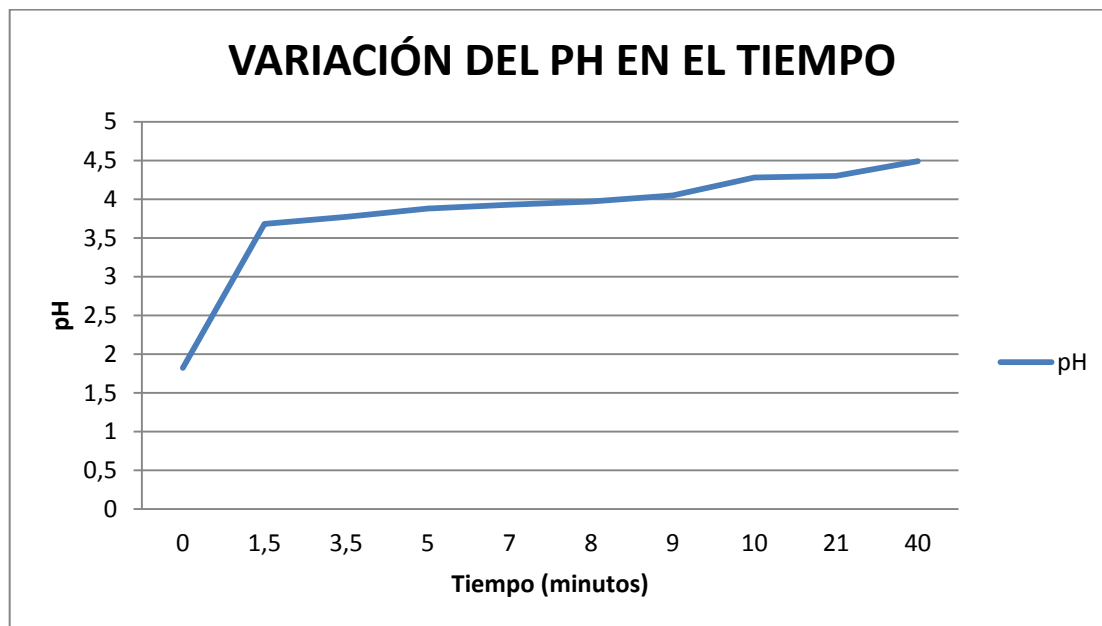
Fuente: CHAJÓN RAMIREZ, F. J. *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius.* p. 98.

Tabla VII. Variación del pH en el tiempo

Tiempo (min)	pH
0	1,82
1,5	3,68
3,5	3,77
5	3,88
7	3,93
8	3,97
9	4,05
10	4,28
21	4,3
40	4,49

Fuente: CHAJÓN RAMIREZ, F. J. *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius.* p. 99.

Figura 28. Variación del pH en el tiempo



Fuente: CHAJÓN RAMIREZ, F. J. *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius.* p. 101.

Tabla VIII. Comportamiento de la temperatura en el tiempo

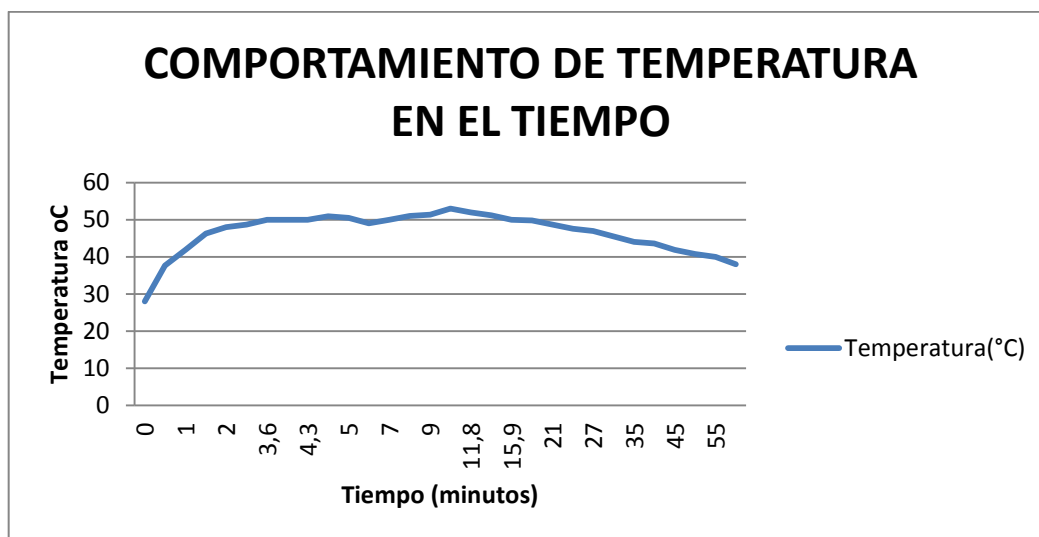
Tiempo (min)	Temperatura(°C)
0	28
0,5	37,7
1	41,9
1,3	46,3
2	48
3	48,7
3,6	50
4	50
4,3	50
4,7	50,9
5	50,5
5,9	49

Continuación de la tabla VIII.

7	50
8	51
9	51,4
10	53
11,8	52
13,8	51,2
15,9	50
18	49,8
21	48,7
24	47,6
27	47
31	45,5
35	44
40	43,6
45	41,9
50	40,8
55	40
60	38

Fuente: CHAJÓN RAMIREZ, F. J. *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius.* p. 103.

Figura 29. Comportamiento de la temperatura en el tiempo



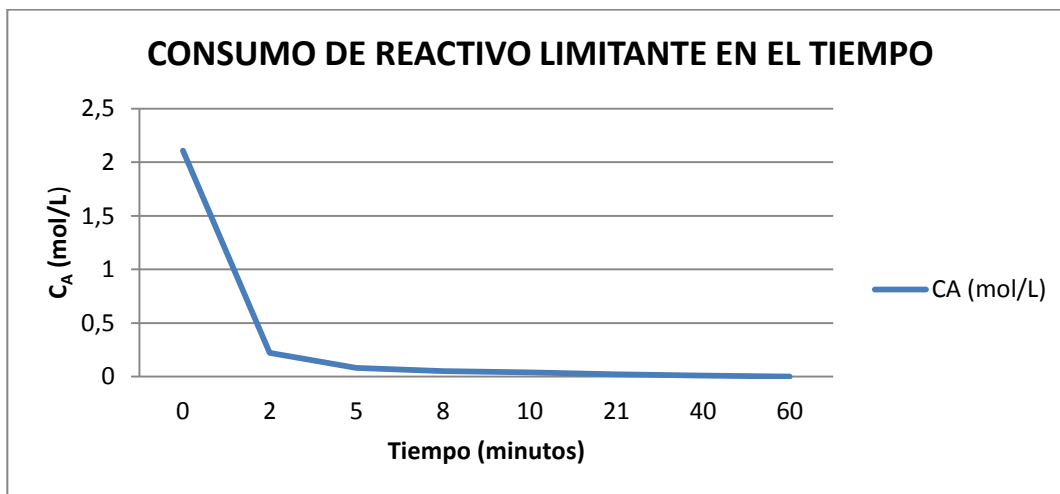
Fuente: CHAJÓN RAMIREZ, F. J. *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius.* p. 104.

Tabla IX. Consumo reactivo limitante en el tiempo

Tiempo (min)	C <sub>A</sub> (mol/L)
0	2,11
2	0,22
5	0,08
8	0,05
10	0,04
21	0,02
40	0,01
60	0

Fuente: CHAJÓN RAMIREZ, F. J. *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius.* p. 104.

Figura 30. Consumo de reactivo limitante en el tiempo



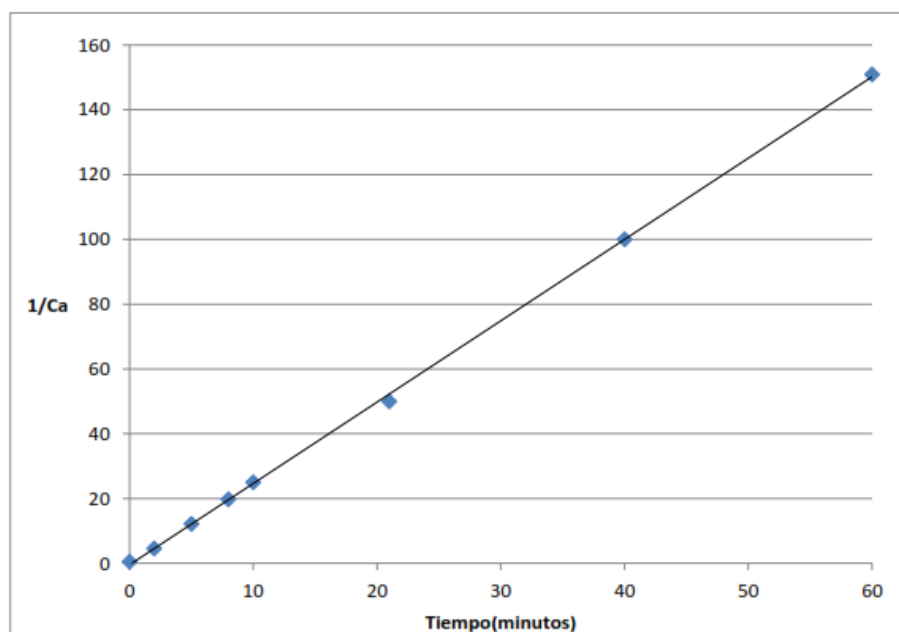
Fuente: CHAJÓN RAMIREZ, F. J. *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius.* p. 106.

Tabla X. Ajuste gráfico a reacción de segundo orden

Tiempo (min)	CA (mol/L)	-dCA/dt	ln(-dCA/dt)	ln(CA)
0	2,11	-	-	0,75
2	0,22	0,95	-0,06	-1,51
5	0,08	0,05	-3,06	-2,53
8	0,05	0,01	-4,61	-3,00
10	0,04	0,01	-5,30	-3,22
21	0,02	0,00	-6,31	-3,91
40	0,01	0,00	-7,55	-4,61
60	0,00	0,00	-7,96	-5,81

Fuente: CHAJÓN RAMIREZ, F. J. *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius.* p. 107.

Figura 31. Ajuste de reacción a segundo orden



Modelo	R <sup>2</sup>	Intervalo de validez
$1/CA = 2,5116t - 1/(2,09)$	0,997	(0, 60) minutos

Fuente: CHAJÓN RAMIREZ, F. J. *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius.* p. 110.

Tabla XI. Resultados días de producción/*batch*

FECHA	pH	CA(g/L)	dens 20 (kg/L)	dens25 (kg/L)	Base (kg)*	Ácido (kg)**
20/04/2015	5,22	361	1,164	1,162	2 990	5 206
20/04/2015	5,17	367	1,168	1,166	2 984	5 206
21/04/2015	5,16	368	1,168	1,166	2 984	5 206
21/04/2015	5,14	370	1,169	1,166	2 954	5 226
22/04/2015	5,21	361	1,164	1,162	3 040	5 237
22/04/2015	5,15	367	1,168	1,166	3 045	5 299
27/04/2015	5,16	360	1,165	1,162	3 040	5 300
27/04/2015	5,2	361	1,165	1,163	2 988	5 300
29/04/2015	5,16	371	1,169	1,166	2 900	5 300
29/04/2015	5,22	363	1,166	1,164	2 985	5 300
04/05/2015	5,16	364	1,165	1,162	2 985	5 300
04/05/2015	5,14	370	1,169	1,166	2 985	5 300
12/05/2015	5,18	368	1,167	1,165	2 985	5 300
12/05/2015	5,15	368	1,167	1,165	2 985	5 300
16/05/2015	5,21	358	1,165	1,162	3 000	5 300

\* IPA

\*\* Glifosato

Fuente: elaboración propia.

Para el estudio en cuestión se estará considerando lo siguiente:

- Densidades: se miden mediante balanza de densidades.

Figura 32. Balanza de densidades



Fuente: Manual de laboratorio empresa XYZ. p. 30.



- Concentraciones finales se miden mediante una HPLC, que tiene una bomba cuaternaria, columna 10 SAX de 250 mm, horno 40 °C y un AOAC 996.12.

Figura 33. **HPLC**



Fuente: *Manual de laboratorio de la empresa XYZ.* p. 31.

- pH se mide mediante un potenciómetro digital.

Figura 34. **Potenciómetro**



Fuente: *Manual de laboratorio de la empresa XYZ.* p.31.

- Rango de concentraciones finales= 360+/- 5 % con base en el ingrediente activo
- Rango de pH final = 4.95 -5.40 con base en la neutralización ácido-base
- Rango densidad 20 grados centígrados= 1.16 – 1.1950
- Rango densidad 25 grados centígrados= 1.16 – 1.19
- Capacidad del tanque en litros (reactor *batch*) para formulación = 14 000 litros
- Tamaño de tanque en litros (reactor *batch*) = 16 000 litros
- Tiempo mezclado por *batch*= 6 horas
- Velocidad mezclado = 125 rpm
- El ácido (glifosato) tiene una concentración de 95%
- La IPA se encuentra al 70 %
- Rango de temperatura final de la reacción 50- 55 °C

### 3.2. Análisis de datos e interpretación de resultados

- Orden de reacción

Debido a que a nivel industrial no se puede parar la reacción ni existe un método para la toma de datos de temperaturas, concentraciones, pH con respecto a tiempos; para el presente estudio se tomará como base los datos experimentales dados por Chajón Ramirez, en su libro: *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius*; en la cual mediante el método diferencial demuestra que la reacción de aminación del glifosato es de segundo grado, tal y como se observa en la figura 28.

- Velocidad de reacción

La velocidad de reacción disminuye con el tiempo, debido a la disminución de la concentración de reactivos, tal y como se puede observar en la figura 1. Según esta gráfica se deduce la siguiente ley de velocidad

$$v = k [\text{glifosato}] [\text{IPA}]$$

Donde K es la constante de velocidad, la cual depende de factores como la temperatura. Véase figura 24

- Grado de formación del producto C (ingrediente activo)

La medición de pH en el tiempo que indica cuánto de ácido se va consumiendo con respecto a la base que se le va agregando la cual es igual al grado de formación del ingrediente activo que interesa como producto final vease figura 25.

- Análisis de resultados obtenidos a nivel industrial: según dato presentado en tabla XII de fuente propia

El reactor en estudio es tipo *batch*. Tiene capacidad para 16 000 litros de los cuales para la formulación se utilizan 14 000 litros.

Debido a que la cantidad consumida de IPA depende del ácido, se calculará el consumo de IPA teórico con respecto a la masa de ácido gastado.

IPA teórica = (peso molecular IPA/peso molecular glifosato)\*masa ácido \*0,95/0,7)

Los datos se resumen en la tabla XIII.

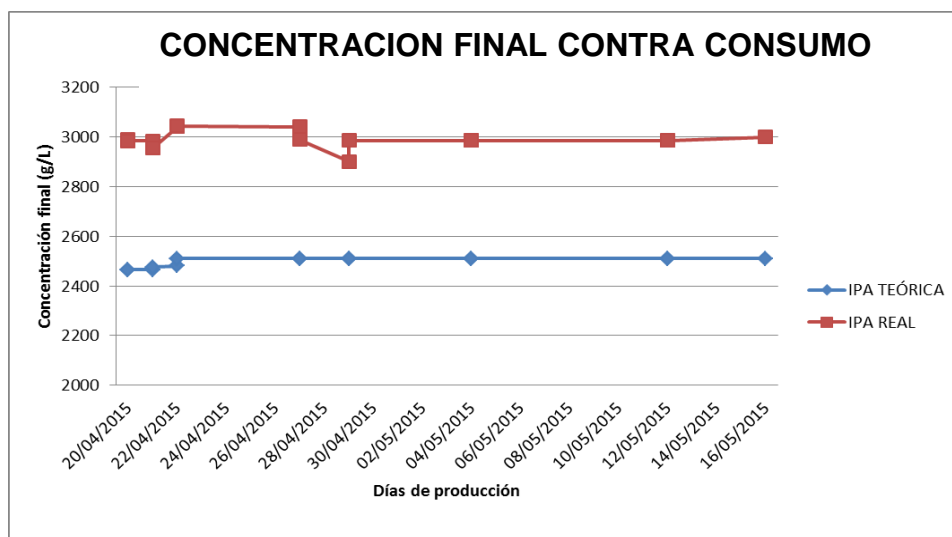
Tabla XII. Resultados IPA teórica

FECHA	pH	C <sub>A</sub> (g/L)	dens 20 (kg/L)	dens25 (kg/L)	Base (kg)*	IPA TEÓRICA	EXCESO IPA	Ácido (kg)**
20/04/2015	5,22	361	1,164	1,162	2 990	2 465,5578	524,442201	5 206
20/04/2015	5,17	367	1,168	1,166	2 984	2 465,5578	518,442201	5 206
21/04/2015	5,16	368	1,168	1,166	2 984	2 465,5578	518,442201	5 206
21/04/2015	5,14	370	1,169	1,166	2 954	2 475,02978	478,970215	5 226
22/04/2015	5,21	361	1,164	1,162	3 040	2 480,23938	559,760623	5 237
22/04/2015	5,15	367	1,168	1,166	3 045	2 509,60253	535,397469	5 299
27/04/2015	5,16	360	1,165	1,162	3 040	2 510,07613	529,923869	5 300
27/04/2015	5,2	361	1,165	1,163	2 988	2 510,07613	477,923869	5 300
29/04/2015	5,16	371	1,169	1,166	2 900	2 510,07613	389,923869	5 300
29/04/2015	5,22	363	1,166	1,164	2 985	2 510,07613	474,923869	5 300
04/05/2015	5,16	364	1,165	1,162	2 985	2 510,07613	474,923869	5 300
04/05/2015	5,14	370	1,169	1,166	2 985	2 510,07613	474,923869	5 300
12/05/2015	5,18	368	1,167	1,165	2 985	2 510,07613	474,923869	5 300
12/05/2015	5,15	368	1,167	1,165	2 985	2 510,07613	474,923869	5 300
16/05/2015	5,21	358	1,165	1,162	3 000	2 510,07613	489,923869	5 300

\* IPA= MONOISOPROPILAMINA (C<sub>3</sub>H<sub>9</sub>N)  
REAL  
\*\* glifosato ácido c<sub>3</sub>H<sub>8</sub>NO<sub>5</sub>P)

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Concentración final contra el consumo IPA



Fuente: elaboración propia.

- Conclusión de gráfica: se está usando más IPA de lo que se debería estar usando con base en la cantidad de glifosato ácido usado por *batch*.

De acuerdo a la tabla XII se calcula la cantidad de glifosato ácido teórico necesario en cada *batch* para hacerlo reaccionar con el IPA.

Se calculará de la manera siguiente:

$$\text{Acido teórico} = ((\text{volumen } \textit{batch} * \text{concentración del ácido ideal})/0,95)$$

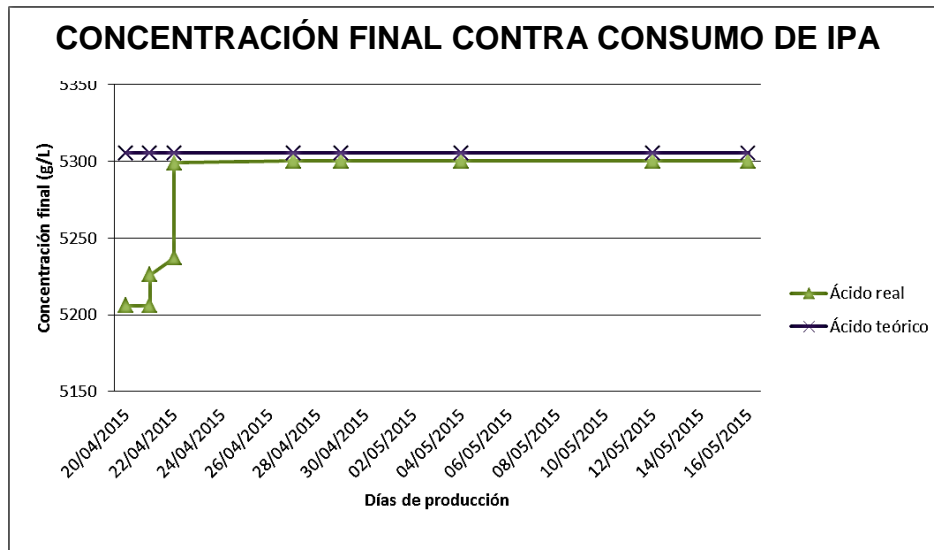
Los resultados se resumen en la tabla XIV.

**Tabla XIII. Ácido teórico necesario en cada *batch* para hacerlo reaccionar con el IPA**

Fecha	C <sub>a</sub> (g/l)	Ipa real	Ipa teórica	Exceso ipa	Ácido real	Ácido teórico	Faltante ácido
20/04/2015	361	2 990	2 465,5578	524,442201	5 206	5 305	99
20/04/2015	367	2 984	2 465,5578	518,442201	5 206	5 305	99
21/04/2015	368	2 984	2 465,5578	518,442201	5 206	5 305	99
21/04/2015	370	2 954	2 475,02978	478,970215	5 226	5 305	79
22/04/2015	361	3 040	2 480,23938	559,760623	5 237	5 305	68
22/04/2015	367	3 045	2 509,60253	535,397469	5 299	5 305	6
27/04/2015	360	3 040	2 510,07613	529,923869	5 300	5 305	5
27/04/2015	361	2 988	2 510,07613	477,923869	5 300	5 305	5
29/04/2015	371	2 900	2 510,07613	389,923869	5 300	5 305	5
29/04/2015	363	2 985	2 510,07613	474,923869	5 300	5 305	5
04/05/2015	364	2 985	2 510,07613	474,923869	5 300	5 305	5
04/05/2015	370	2 985	2 510,07613	474,923869	5 300	5 305	5
12/05/2015	368	2 985	2 510,07613	474,923869	5 300	5 305	5
12/05/2015	368	2 985	2 510,07613	474,923869	5 300	5 305	5
16/05/2015	358	3 000	2 510,07613	489,923869	5 300	5 305	5
* IPA= MONOISOPROPILAMINA (C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N) REAL							
** glifosato ácido (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> NO <sub>5</sub> P)							

Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Ácido teórico necesario en cada *batch* para hacerlo reaccionar con el IPA**



Fuente: elaboración propia.

- Conclusión de la gráfica: se puede observar que se está consumiendo menos ácido de lo que se necesita durante las fechas 20, 21 y 22 de abril del 2015. Las variaciones en kg van de (68 a 99 kg) menos.

Para evaluar la funcionalidad del reactor se analizará:

- Grado de conversión del glifosato ácido mediante la medición del  $pH_{final}$  que al irse consumiendo evidencia el grado de formación del producto que se quiere. El rango de  $pH_{final}$  debe estar entre 4,95 – 5,40.
- La  $T_{final}$  que indicará si el control de temperatura por parte del sistema de enfriamiento del reactor es apropiado o no. El rango de T debe estar entre 50 – 55 °C.

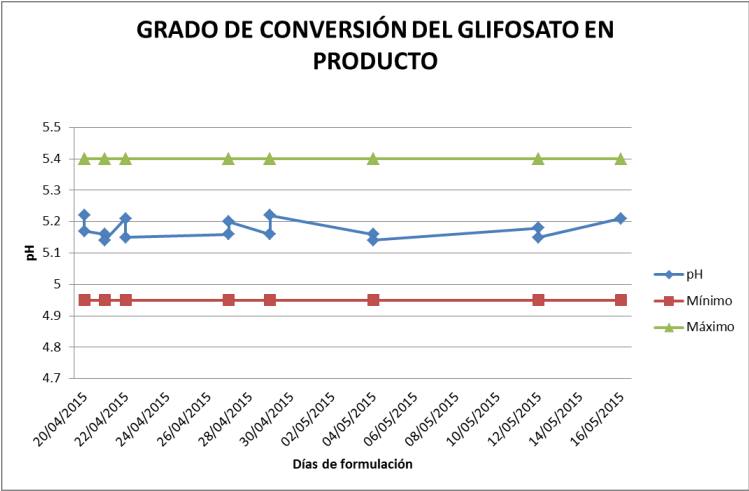
- La  $C_{Afinal}$  que indicará la cantidad de ingrediente activo que tiene el producto. El rango de  $C_A$  debe estar entre 360 +/- 5% g/L.

Tabla XIV. Temperaturas finales en los días de producción

<b>RESULTADOS DÍAS DE PRODUCCIÓN/BATCH</b>					
<b>FECHA</b>	<b>pH</b>	<b><math>C_A</math>(g/L)</b>	<b><math>T_{final}</math> °C</b>	<b>Base (kg)*</b>	<b>Ácido (kg)**</b>
20/04/2015	5,22	361	68	2 990	5 206
20/04/2015	5,17	367	70	2 984	5 206
21/04/2015	5,16	368	68	2 984	5 206
21/04/2015	5,14	370	65	2 954	5 226
22/04/2015	5,21	361	68	3 040	5 237
22/04/2015	5,15	367	61	3 045	5 299
27/04/2015	5,16	360	60	3 040	5 300
27/04/2015	5,2	361	63	2 988	5 300
29/04/2015	5,16	371	61	2 900	5 300
29/04/2015	5,22	363	58	2 985	5 300
04/05/2015	5,16	364	55	2 985	5 300
04/05/2015	5,14	370	56	2 985	5 300
12/05/2015	5,18	368	65	2 985	5 300
12/05/2015	5,15	368	60	2 985	5 300
16/05/2015	5,21	358	62	3 000	5 300
* IPA					
** Glifosato					
<b>NOTA: los rangos tomados como referencia parten del kPa del glifosato. Fuente: Formuladora XYZ en cuestión.</b>					

Fuente: elaboración propia.

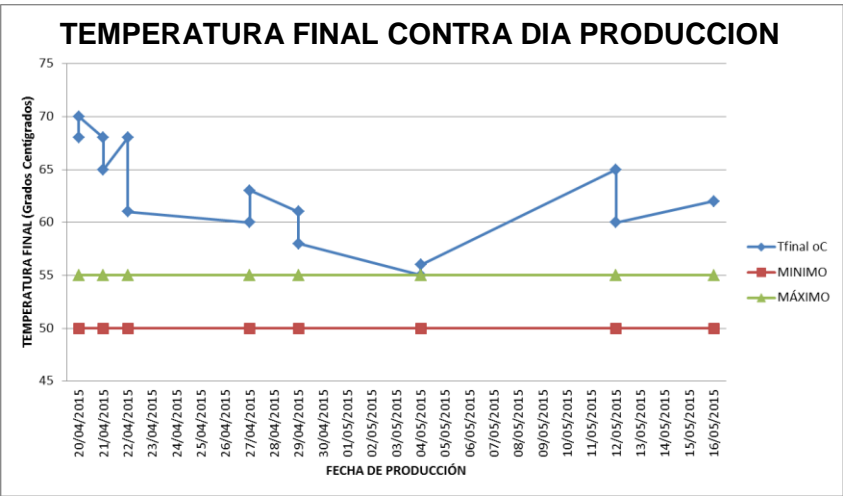
Figura 37. **Grado de conversión del glifosato en producto**



Fuente: elaboración propia.

- Conclusión de gráfica: se puede decir que el grado de conversión del glifosato en el producto cumple con lo esperado.

Figura 38. **Temperatura final contra el día de producción**

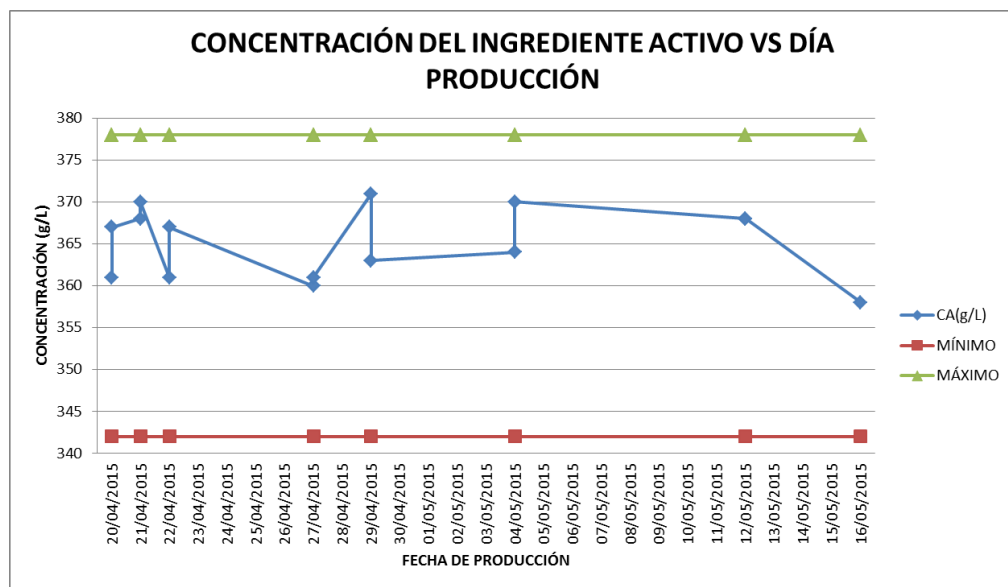


Fuente: elaboración propia.



- Conclusión de la gráfica: se puede evidenciar descontrol de la temperatura final de la reacción sobrepasando siempre el máximo permitido.

Figura 39. **Concentración del ingrediente activo contra día de producción**



Fuente: elaboración propia.

- Conclusiones de la gráfica: la figura evidencia control en la concentración del ingrediente activo.

### 3.3. Cálculos para la fabricación de una torre de enfriamiento de tiro forzado como auxiliar a la que actualmente tiene la empresa XYZ

Se necesita fabricar una torre de enfriamiento como auxiliar por la poca capacidad de enfriamiento de la que actualmente se dispone.

Enfriar 30 000 litros/hora (66 000 lb/hr) de agua de 75 °C (167 °F) a 40 °C (104 °F).

### 3.3.1. Determinación del tamaño de la torre de enfriamiento

Partiendo de los datos objetivo que se necesitan enfriar se determinará el tamaño de la torre de enfriamiento.

Datos de entrada

- Temperatura bulbo seco = 27 °C (80.6 °F)
- Humedad relativa = 70 %
- Caudal = 200 gal/minuto
- Retroalimentación 200 gal/día

Según experiencia del asesor, las torres de enfriamiento trabajan con cargas de aire que oscilan entre 900 a 1 800 lb/h.ft<sup>2</sup> y con cargas de agua entre 500 y 2 000 lb/h.ft<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} \circ \quad & \text{Carga}_{\text{agua diseño}} = L \\ & 110000 \text{ lb/h} \text{ ----- } 1700 \text{ lg/h.ft}^2 \\ & 66,000 \text{ lb/h} \text{ ----- } X \\ & L = 1020 \text{ lb/h.ft}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ \quad & \text{Área torre} = \text{carga}_{\text{total}} / \text{carga}_{\text{agua diseño}} \\ & \text{Área torre} = 66,0000 / 1020 \text{ aprox. } 65 \text{ ft}^2 \\ & \text{Área torre} \sim 65 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

- Se puede definir una carga de aire fija como factor de diseño, se recomienda que esta carga de aire sea como mínimo la mitad de la carga de agua para rangos de enfriamiento de 10 °C, aunque se pueden utilizar factores entre 0,5 y 1,5 que pueden aumentar significativamente el costo del equipo. Debido a que el  $\Delta T$  es mayor de 10 °C se optará por el factor 1,5

$$\text{Carga}_{\text{aire diseño}} = G = 1.5 * \text{Carga}_{\text{agua diseño}}$$

$$G = 1.5 * 1020$$

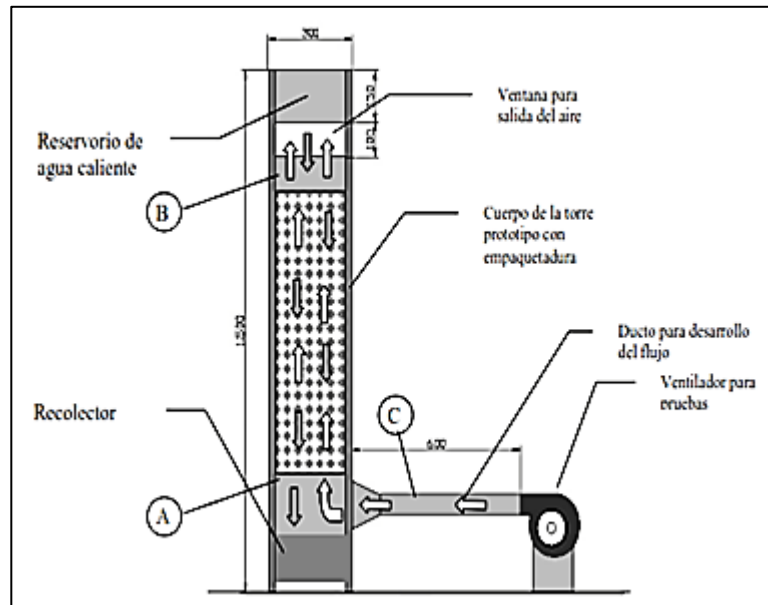
$$G = 1530 \text{ lb/h.ft}^2$$

- ¿Qué altura debe tener la empaquetadura de la torre?

La altura de la empaquetadura dependerá de su capacidad de transferencia de calor. Para este caso se determinará teóricamente, ya que no se cuenta con presupuesto ni prototipo experimental de torre de enfriamiento para su determinación experimental.

El prototipo teórico de la torre de enfriamiento a usar será el siguiente:

Figura 40. **Prototipo experimental de torre de enfriamiento**

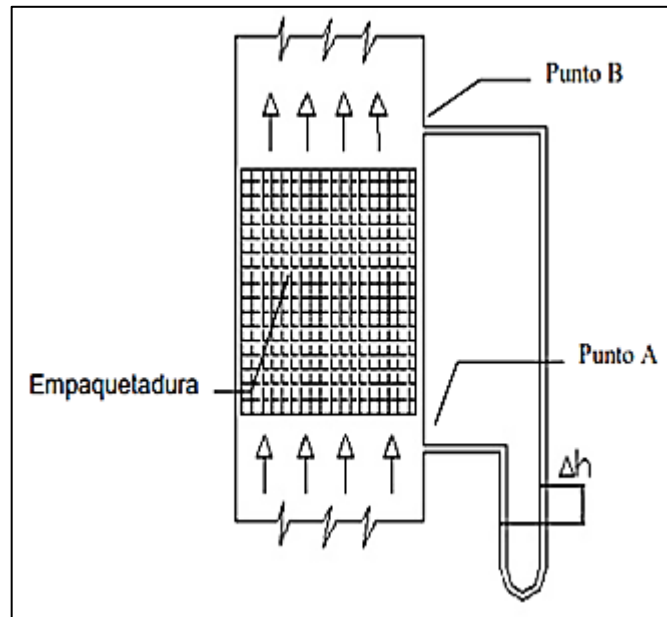


Fuente: IÑIGUEZ DONOSO, Jorge Antonio. *Cálculo y diseño de empaquetadura y ventiladores para una torre de enfriamiento de tiro forzado*. p. 3.

La caída de presión dentro de la empaquetadura se puede medir utilizando un manómetro diferencial colocado entre los puntos A y B, esta caída de presión determinará la presión estática mínima que debe producir un ventilador para permitir que el aire pase a través de la empaquetadura. El punto C se puede utilizar para medir el caudal de aire que ingresa al prototipo utilizando un tubo pitot.

El esquema de medición de la caída de presión dentro de la empaquetadura se muestra en la figura 41.

Figura 41. **Medición de caída de presión en la empaquetadura**



Fuente: IÑIGUEZ DONOSO, Jorge Antonio. *Cálculo y diseño de empaquetadura y ventiladores para una torre de enfriamiento de tiro forzado*. p. 3.

Los empaques pueden ser de diversos materiales y arreglos, generalmente son de plástico o de madera incorruptible, su función primordial es crear una película uniforme para la transferencia de calor y mantener el agua el mayor tiempo posible dentro de la torre.

Para el presente estudio se va a utilizar un empaque de bajo presupuesto y alta eficiencia. Se utilizará bandejas portahuevos de plástico.

Para hacer los cálculos teóricos en el prototipo en cuestión se asumirá lo siguiente:

- Se regula el flujo de aire de entrada mediante obturación de la entrada del ventilador; por prueba y error utilizando un tubo pitot se regula el flujo de aire hasta que sea el requerido. Para el presente caso  $G = 1530 \text{ lb/h.ft}^2$ )
- Se regula el flujo de entrada del agua, teniendo bandejas de entrada de agua con perforaciones de diversos diámetros para obtener un caudal de  $L = 1020 \text{ lb/h.ft}^2$
- Calentar agua (usando cualquier método) hasta llevarla a la temperatura requerida ( $75^\circ\text{C}$ ).
- Medir la humedad relativa del aire circulante y la temperatura respectivamente, usando un higrómetro/termómetro. (Humedad relativa 70 %, Temperatura entrada aire  $27^\circ\text{C}$  que es la promedio en los días monitoreados).
- Se pone en funcionamiento el ventilador y se permite el flujo del agua, se mide la humedad relativa y temperatura del aire de salida (Humedad relativa 98 %, temperatura del aire de salida  $40^\circ\text{C}$ ).
- Se mide la temperatura del agua en el fondo de la torre ( $20^\circ\text{C}$ )

Con ayuda de las cartas psicométricas se puede calcular la entalpía de entrada ( $H_1$ ) (para este cálculo es:  $H_1 = 35,89 \text{ BTU/lb}$ ) y salida del aire ( $H_2$ ) (para el cálculo es:  $H_2 = 80,28 \text{ BTU/lb}$ ).

Con estos valores se determina el  $K_x a$  de la empaquetadura mediante la integración numérica de:

$$K_x a (V/L) = \int_1^2 dT / (H' - H) \quad (\text{ec.1})$$

Donde

$V$  = volumen de la empaquetadura (para este caso  $V = 1,13 \text{ ft}^3$ ).

Recordar que se a usar una empaquetadura de bandejas de huevos de plástico.

$L$  = gasto de agua de entrada ( $L = 1\,020 \text{ lb/h.ft}^2$ ).  $H'$  es la entalpía de saturación del aire (no es la misma para el aire de entrada que el de salida).

Cabe recalcar que la ecuación 1 no se puede resolver analíticamente, por cuanto  $H'$  como  $H$  son variables, por lo que se utilizan métodos gráficos y numéricos (En este caso se usó la regla de Simpson o trapezoidal), dando un valor de  $K_x a = 171,5 \text{ lb/h.ft}^3 (\text{lb/lb})$

Para calcular la altura de la torre una vez conocido que  $K_x a = 171.5 \text{ lb/h.ft}^3$  se despeja el valor de las unidades de difusión  $n_d$  de la siguiente ecuación

$$n_d = \int dT / (H' - H) = K_x a (V/L) \text{ (ec. 2)}$$

$$n_d = 0,1899$$

La altura  $Z$  de la torre será igual a:

$$Z = n_d L / K_x a \text{ (ec. 3)}$$

Sustituyendo datos se tiene que:

$$Z = 1,13 \text{ ft} = 345 \text{ mm}$$

Como modo de resumen se adjuntan los datos calculados y obtenidos para el prototipo en cuestión:

$$T1_{\text{(agua ingreso)}} = 75 \text{ }^{\circ}\text{C} (167 \text{ }^{\circ}\text{F})$$

$T_2$ (agua salida)	= 40 °C (104 °F)
$\Delta T$	= 35 °C
$L_{\text{(agua)}}$	= 1 020 lb/h.ft <sup>2</sup>
$G_{\text{(aire)}}$	= 1 530 lb/h.ft <sup>2</sup>
$T_0$ (aire ingreso)	= 27 °C (80,6 °F)
$T_S$ (aire salida)	= 40 °C (104 °F)
$\Phi_{\text{(aire ingreso)}}$	= 70%
$\Phi_{\text{(aire salida)}}$	= 98 %
$H_1$	= 35,89 BTU/lb
$H_2$	= 80,28 BTU/lb
$L_o$ (agua restitución)	= 18,66 lb/h.ft <sup>2</sup>
$V_{\text{(empaquetadura)}}$	= 1,13 ft <sup>3</sup>
$K_{xa}$	= 171,5 lb/h.ft <sup>3</sup> (lb/lb)
$nd$	= 0,1899
$Z$	= 1,31 ft (345mm)
$\Delta P_{\text{(en la empaquetadura)}}$	= 0,066 pulgH <sub>2</sub> O

Tomar en consideración que para construir una torre de tamaño real, bastará utilizar los parámetros de empaquetadura mostrados, es decir, el área de la torre no debe ser menor que 65 ft<sup>2</sup> y la altura de su empaquetadura no debe ser inferior que 345 mm.

Para calcular la altura real de la torre se tiene:

$$Z = 1,31 \text{ ft (345 mm)}$$



Si se ponen tubos de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, el número de platos de la torre estará dado por:

$$\text{Núm. de platos} = ((Z/(\frac{3}{4})) * 12$$

$$\text{Núm. de platos} = 20,96$$

Si se colocan los platos a un pie de altura se tendrá una torre de h mts

$$\text{Núm. de platos} * 0,3049 = \text{altura (h) de la torre}$$

$$\text{Altura de la torre} = 6,39 \text{ mts}$$

### **3.3.2. Cálculo y escalamiento de los ventiladores**

De acuerdo a lo calculado anteriormente, el gasto de aire debe ser del orden de  $G = 1\,530 \text{ lb/h.ft}^2$ . Como se tiene un área de transferencia  $A = 65 \text{ ft}^2$ , el gasto total de aire será:

$$G_{\text{total}} = 1\,530 * 65 = 99\,450 \text{ CFM}$$

$$G_{\text{total}} = 99\,450 \text{ CFM}$$

Esta es una cantidad considerable como para pensar en un solo ventilador, normalmente se recomienda utilizar más de un ventilador por razones de mantenimiento; porque en caso de fallar uno, la torre eventualmente podría seguir operando.

Para el presente caso se utilizarán 2 ventiladores de 5 000 CFM cada uno que posean una presión estática de operación superior a 0,066 pulgH<sub>2</sub>O, a fin de que el aire pueda circular a través de la empaquetadura.

Para diseñar los ventiladores se utilizará un ventilador como modelo y luego se escalonará hasta las dimensiones requeridas. Para el presente prototipo se calculará de la siguiente manera: Utilizando similitud dinámica:

Figura 42. **Similitud dinámica**

$$\begin{aligned}\frac{Q_1}{\omega_1 D_1^3} &= \frac{Q_2}{\omega_2 D_2^3} \\ \frac{H_1}{\omega_1^2 D_1^2} &= \frac{H_2}{\omega_2^2 D_2^2} \\ \frac{P_1}{\rho_1 \omega_1^3 D_1^5} &= \frac{P_2}{\rho_2 \omega_2^3 D_2^5}\end{aligned}$$

Fuente: IÑIGUEZ DONOSO, Jorge Antonio. *Cálculo y diseño de empaquetadura y ventiladores para una torre de enfriamiento de tiro forzado*. p. 4.

Donde

Q = caudal

$\omega$  = velocidad angular

D = diámetro del rotor

P = potencia

$\rho$  = densidad del aire

Se pueden usar estas fórmulas siempre y cuando el modelo y el prototipo sean geoméricamente similares (proporciones iguales), cinemáticamente similares y dinámicamente similares.

Para escalar los ventiladores del presente prototipo se tomará como modelo un ventilador centrífugo de paletas rectas, marca Trane tipo S tamaño 13.

Las dimensiones de ese ventilador son las siguientes:

Diámetro del rotor (D1)	= 575 mm
Caudal (Q1)	= 1 656 CFM
Velocidad ( $\omega_1$ )	= 900 RPM
Presión estática (H1)	= 2 pulg H <sub>2</sub> O
Potencia al freno (P1)	= 0,93 BHP
Potencia real consumida	= 1,16 HP
Número de alabes	= 8

Utilizando las fórmulas dadas se obtienen las siguientes características para este prototipo:

Siendo Q<sub>2</sub> = 5 000 CFM y  $\omega_2$  = 994,5 RPM

$$D_2 = ((Q_2 * \omega_1 * D_1^3) / (\omega_2 * Q_1))^{1/3}$$

$$D_2 = 803,86 \text{ mm}$$

$$H_2 = ((H_1 * \omega_2^2 * D_2^2) / (\omega_1^2 * D_1^2))$$

$$H_2 = 4,77 \text{ pulg H}_2\text{O}$$

$$P_2 = ((P_1 \omega_2^3 D_2^5) / (\omega_1^3 D_1^5))$$

$$P_2 = 6,70 \text{ BHP}$$

Con estos valores se puede entonces, construir una torre de enfriamiento de tiro forzado para 30 000 lt/hora que pueda lograr un  $\Delta T$  de 35 °C.

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente estudio toma en consideración el glifosato como base para la fabricación de herbicidas líquidos. Sus propiedades físicas, químicas, termodinámicas, entre otras servirán como base para el diseño de un reactor *batch* termocontrolado, en cuyo interior tendrá lugar una reacción química de tipo exotérmico.

La idea del diseño será maximizar la conversión y selectividad de la reacción al menor coste posible; el diseño de este reactor químico requerirá conocimientos de termodinámica, cinética química, transferencia de masa y energía, así como de mecánica de fluidos; balances de materia y energía. Se buscará conocer el tamaño del reactor, así como el método de operación, además con base en los parámetros de diseño se espera predecir con cierta certidumbre la conducta del reactor ante ciertas condiciones, por ejemplo, un salto en escalón en la composición de entrada.

Debido a que el punto central es un reactor tipo *batch* que trabaja en estado no estacionario (tanque agitado); el reactor en cuestión tendrá la ventaja de que su costo de instrumentación será bajo, además de ser flexible en su uso (se le puede detener de modo fácil y rápido). Tendrá la desventaja de un elevado costo en su funcionamiento y de mano de obra, debido a la gran cantidad de tiempo que se pasa parado por la carga, descarga y limpieza; además no siempre es posible implementar un sistema de control adecuado.

El presente estudio analiza la efectividad de un reactor químico tipo *bach* donde se lleva a cabo la reacción exotérmica de glifosato pécnico e

isopropilamina para obtener sal de glifosato en solución, desde el punto de vista del control de la reacción y control de temperatura. Las propiedades físicas, químicas, termodinámicas, entre otras de los reactivos en cuestión, servirán como base para el diseño de un reactor *batch* termo controlado en cuyo interior tendrá lugar una reacción de segundo orden demostrada por Chajón Ramirez, en su trabajo *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius*.

El objetivo final es mejorar el control existente de temperatura en las diferentes partes del proceso y de manera especial durante la reacción, implementando y ajustando un nuevo control, que permita una reducción del tiempo total del proceso, así como un incremento en el rendimiento respecto al control actual (termocontrol).

En la empresa en cuestión, el glifosato pécnico e isopropilamina debieran convertirse en el ingrediente activo (sal de glifosato en solución) de manera definida y controlada demostrandose mediante el pH final de la sal del glifosato en solución el cual debe estar en un rango de 4,95 – 5,40 y, mediante la  $C_A$  final de la sal de glifosato en solución que debiera estar en un rango de 360 +/- 5% (g/L). El descontrol de estas reacciones puede ocurrir por mal funcionamiento del sistema de enfriamiento o por una carga incorrecta de reactivos.

En el caso de estudio se demuestra que, tanto el glifosato pécnico como la IPA en cada uno de los días de producción varían (ver gráficas 6 y 7), en cuanto a peso (kilogramo); cuestión que se debe a las características fisicoquímicas de estos. Por ejemplo, el glifosato pécnico es un polvo muy fino,

que con facilidad crea una nube en el ambiente y, la IPA es volátil. Lo que implica que a mayor temperatura de reacción el consumo de IPA se eleva.

En la actualidad, la empresa en cuestión da por terminada la reacción cuando la solución se encuentra en un rango de temperatura entre 60 y 72 °C . Para entender el porqué de esto se puede decir que se toman como parámetros:

- Que la solución esté completa (transparente)
- pH dentro de los rangos 4,95 – 5,40
- $C_A$  (g/L) esté en un rango de 360 +/- 5 %

Si esto no se cumple se sigue jugando con los reactivos (ácido-base) hasta que se cumplan estos tres parámetros.

El rango de temperatura final de la reacción que actualmente se maneja en la empresa en cuestión, es superior al rango de temperatura óptima que deberá mantenerse entre 50 y 55 °C durante todo el proceso que es la temperatura óptima de acuerdo a la velocidad de reacción y evaporación de la base.debiéndose principalmente, a que actualmente la empresa cuenta con una torre de enriamiento de tiro forzado con capacidad de enfriamiento de 3 500 litros cada 2 días. Hoy se producen 88 000 litros al día.

Se demuestra además, que siendo una reacción de segundo orden pudiendo ser controlada por mezcla total, el diseño de volumen del mezclado de reactor no es relevante. Siendo el mezclado uno de los factores determinantes para completar la reacción y el otro factor el enfriamiento; se demuestra que el diseño físico del reactor no requiere modificaciones en la mayoría de los casos,

como ocurre en esta planta estudiada. El factor determinante en este diseño se encuentra en el enfriamiento.

Por tal razón se calculó una torre de enfriamiento de tiro forzado como auxiliar a la torre de enfriamiento actual, tomando como base un  $\Delta T$  de 35 °C para el agua ( $T_1 = 75$  °C y  $T_2 = 40$  °C); Debido a que el  $\Delta T$  es bastante amplio, se asumió un factor de diseño para la carga de aire de 1,5. Los cálculos de empaquetadura para la torre prototipo toman en consideración bandejas portahuevos de plástico debido a su bajo presupuesto y alta eficiencia. El  $K_{xa} = 171,5$  lb/h.ft<sup>3</sup> y la  $Z = 1,31$  ft.

Para construir la torre auxiliar de tamaño real, bastará utilizar los parámetros de empaquetadura mostrados, es decir, el área de la torre no debe ser menor que 65 ft<sup>2</sup> y la altura de su empaquetadura no debe ser inferior que 345 mm.

Se hicieron los cálculos suponiendo que se pondrán portahuevos con aberturas (tubos) de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, por lo que el número de portahuevos (platos) de la torre debe de ser de 21 platos. Si se asume que los platos se colocarán a un pie de altura sale que la torre de enfriamiento auxiliar debe tener una altura de 6,39 mts.



## CONCLUSIONES

1. Se está usando más IPA de lo que se debería estar utilizando con base en la cantidad de glifosato ácido usado por *batch*.
2. Se observa que se está consumiendo menos ácido de lo que se necesita durante las fechas 20, 21 y 22 de abril del 2015. Las variaciones en kilogramo van de (68 a 99 kg) menos.
3. El grado de conversión del glifosato en producto cumple con lo esperado.
4. Se pudo evidenciar el descontrol de la temperatura final de la reacción sobrepasando siempre el máximo permitido.
5. Se evidencia control en la concentración del ingrediente activo.
6. La torre de enfriamiento auxiliar propuesta tiene una altura de 6,39 mts, para un  $K_{xa} = 171,5 \text{ lb/h.ft}^3 \text{ (lb/lb)}$ , un  $n_d = 0,1899$ , un  $Z = 1,31 \text{ ft}$ , un  $V_{\text{empaquetadura}} = 1,13 \text{ ft}^3$  y un  $L_o(\text{agua}) = 18,66 \text{ lb/h.ft}^2$



## RECOMENDACIONES

1. Siendo el mezclado uno de los factores determinantes para completar la reacción y el otro factor el enfriamiento; se demuestra que el diseño físico del reactor no requiere modificaciones en la mayoría de los casos, como ocurre en esta planta estudiada. El factor determinante en este diseño se encuentra en el enfriamiento.
2. La construcción de una torre de enfriamiento de tiro forzado de 6,39 mts como auxiliar a la torre de enfriamiento actual, tomando como base un  $\Delta T$  de 35,°C para el agua ( $T_1 = 75,^{\circ}\text{C}$  y  $T_2 = 40,^{\circ}\text{C}$ ); los cálculos detallados.
3. Como primer paso se asume y se regula el flujo de aire de entrada (G), seguido se regula el flujo de entrada del agua para obtener un caudal (L), se calienta el agua hasta una temperatura máxima requerida, posteriormente se mide la humedad relativa del aire circundante y la temperatura, luego se mide la humedad relativa y temperatura del aire de salida, se mide la temperatura del agua en el fondo de la torre, luego con la carta psicrométrica se calculan las entalpías de entrada y salida del aire para poder calcular la constante de la empaquetadura y por último se calcula la altura de la torre.



## BIBLIOGRAFÍA

1. 42921-42928, U. E. *Pesticide Tolerances*. Final Rulem Environmental Protection Agency. Estados Unidos: Federal Register. 2006.
2. ATKINS, Julio. *Química Física*. Madrid: Reverté, 2007. 1184 p.
3. CONICET, C. N. *Evaluación de la información científica vinculada al glifosato en su incidencia sobre la salud humana y el ambiente*. Argentina: Ciudad Autónoma, 2000. 133 p.
4. Comité europeo, A. *Características fisicoquímicas para el glifosato*. Alemania: Comité Europeo. 2002. 315 p.
5. CUNILL, Fidel; IBORRA, Montserrat. *Reactores químicos*. Barcelona: Universitat de Barcelona. 2010. 122 p.
6. CHAJÓN RAMÍREZ, F. J. *Evaluación de distintas proporciones de reactivo en exceso en la reacción de aminación para la formación del herbicida sal isopropilamina de n-fosfonometilglicina (glifosato), para optimizar sus condiciones de almacenamiento a cero grados celsius*. Trabajo de graduación de Ing. Química: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2014. 145 p.
7. LEGUIZAMON, Eduardo. *Herbicidas características y fundamentos de su actividad*. Argentina: Vitta Javier, 2004. 116 p.

8. FAO. 37 FAO/WHO JMPR, Pesticide residues in food, meetings in Roma & Genève, FAO Plant production & protection. Rome, Italy: Paper 93/1, 2000. 197 p.
9. FERNÁNDEZ QUINTANILLA, César; GARCÍA TORRES, Luis. *Fundamentos sobre malas hierbas y herbicidas*. Madrid: Ediciones Mundi-perensa. 1991. 352 p.
10. FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. 3a ed. México: Prentice Hall. 969 p.
11. FROMENT, Gilbert. *Chemical Reactor Analysis and Design*. 3a ed. Alemania: Wiley. 1990. 900 p.
12. GONZALES-UREÑA, Angel. *Cinética química*. Madrid: Síntetis, 2001. 272 p.
13. IÑIGUEZ DONOSO, Jorge Antonio. *Cálculo y diseño de empaquetadura y ventiladores para una torre de enfriamiento de tiro forzado*. Washington: Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2000. 9 p.
14. KAPLAN, Robert; NORTON, David. *Alignment*. 2a ed. Barcelona: Ediciones Gestión, 2000. 346.
15. KERN, Donald. Q. *Procesos de Transferencia de Calor*. México: Cecsa, 1989. 981 p.
16. LEVENSPIEL, Octave. *Ingeniería de las reacciones químicas*. 3a ed. Mexico: Limusa Wiley, 2005. 677 p.

17. MONSANTO. Agricultores España, S. L. *Seguridad del herbicida roundup ready, y de su empleo sobre variedades modificadas genéticamente para tolerancia a glifosato*. [en línea. <[http://www.monsanto.com/monsanto/layout/investor/company/ag\\_prod.asp#rr](http://www.monsanto.com/monsanto/layout/investor/company/ag_prod.asp#rr)>. [Consulta: febrero de 2015].
18. MORGAN y VESILIND. *Reactores químicos y moleculares*. México: Person Educación, 2004. 851 p.
19. PERRY, Robert. *Manual del ingeniero químico*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 1987. 33 p.
20. R., V. W. *Fundamentos de termodinámica*. México: Limusa, 1995. 275 p.
21. SANTAMARÍA, Jesús; HERGUIDO. Javier. *Ingeniería de reactores*. Madrid: Síntesis, 1999. 345 p.
22. VAN WYLEN, Gordon. *Fundamentos de termodinámica*. 2a ed. México: Limusa, 1995. 892 p.





## APÉNDICES

### Apéndice 1. Matriz de coherencia

Pregunta de investigación	Objetivos	Hipótesis	Método propuesto	Resultados esperados
¿Es posible diseñar una planta formuladora de herbicidas líquidos utilizando datos fisicoquímicos, termodinámicos y cinéticos de sus compuestos bases?	Diseñar una planta formuladora de herbicidas líquidos utilizando datos fisicoquímicos, termodinámicos y cinéticos de sus compuestos base.	Es posible diseñar una planta formuladora de herbicidas líquidos utilizando datos fisicoquímicos, termodinámicos y cinéticos de sus compuestos bases	De tipo mixto. Cualitativo y cuantitativo 1) Utilización de datos fisicoquímicos, termodinámicos y cinéticos para el diseño de los equipos necesarios para la formulación de herbicidas líquidos. 2) Análisis en laboratorio fisicoquímico 3) Diseño de equipo 4) Balances de materia y energía 5) Estudio de mecanismos de reacción de los compuestos bases en cuestión.	diseño de equipo utilizando datos fisicoquímicos termodinámicos y cinéticos del Glifosato.

Continuación del apéndice 1.

¿Es posible utilizar los mecanismos de reacción del Glifosato para diseñar un reactor batch termo controlado necesario en la formulación de herbicidas líquidos?	-Verificar que el calor de reacción, fusión y solución del Glifosato pueden ser utilizados para el diseño de un reactor batch termo controlado en una planta formuladora de herbicidas líquidos.	Es posible utilizar los mecanismos de reacción del Glifosato para diseñar un reactor tipo batch termo controlado necesario en la formulación de herbicidas líquidos.	1) Análisis de calores de reacción, fusión y solución en laboratorio fisicoquímico. 2) Balances de masa y energía.	Comparar calores de reacción antes y después del diseño de equipos mediante análisis fisicoquímicos y termodinámicos.
¿Se pueden diseñar equipos para la elaboración de herbicidas líquidos mediante el conocimiento de la solubilidad de un compuesto?	- Diseñar los equipos necesarios para la elaboración de herbicidas líquidos tomando en consideración la solubilidad Glifosato en función del Ph, temperatura, agua, alcohol, xileno, glicol.	Se pueden diseñar un reactor tipo batch termo controlado mediante el conocimiento de la solubilidad de un compuesto	1. Estudio de solubilidades de los compuestos bases antes y después del diseño de equipos en un laboratorio fisicoquímico 2. Balances de masa y energía	Diseño de equipos para la elaboración de herbicidas líquidos en base a la solubilidad de los compuestos base.

Fuente: elaboración propia.